



Thèse de Master

Adaptation des villes au changement climatique : un campus EPFL bleu-vert

Loé MAIRE

Superviseurs :
Sabine CHAMOUN
Giovanni DE CESARE
Khalid ESSYAD

Lausanne, Septembre 2021 - Février 2022

Table des matières

Table des figures	iv
Liste des tableaux	vii
1 Introduction	1
1.1 Contexte et problématiques	1
1.2 Objectifs	1
1.3 Les parties prenantes	2
2 Etat de l'art	3
2.1 Prévisions climatiques en Suisse en 2050	3
2.2 Plans d'adaptation au changement climatique en Suisse	4
2.3 Les villes éponges : une solution bleue-verte	4
2.3.1 Gestion des eaux de pluie	6
2.3.2 Biodiversité	8
2.3.3 Confort	9
2.3.4 Infrastructures bleues-vertes : de multiples fonctions et bénéfices	10
2.3.5 Un aperçu général des infrastructures bleues-vertes à travers le monde	12
3 Méthodologie de quantification et qualification du degré d'adaptabilité d'une ville : la Matrice Bleue-Verte	13
3.1 Hypothèses du projet	13
3.2 Identification des indicateurs	13
3.3 Données nécessaires à l'analyse des indicateurs	15
3.4 Échelle de la Matrice Bleue-Verte	16
3.5 Quantification et qualification des indicateurs	17
3.5.1 Démarche générale	17
3.5.2 Infiltration	18
3.5.3 Rétention	19
3.5.4 Stockage	21
3.5.5 Continuité écologique	23
3.5.6 Diversité des milieux	29
3.5.7 Albedo	30
3.5.8 Ombre	31
3.5.9 Mobilier urbain	32

3.6	Définition des zones d'étude	33
3.7	Communication des résultats de la matrice	34
4	Identification de scénarios de mesures améliorant les résultats de la matrice	35
4.1	Étapes de l'étude de variante	35
4.2	Catalogue de mesures	35
4.3	Contraintes hors du projet	37
5	Cas d'application : le campus EPFL	38
5.1	Une volonté de renforcer sa culture de durabilité forte au sein de son établissement	38
5.2	Zones d'études	39
5.3	Données utilisées	41
5.3.1	QGIS comme outil de visualisation des données	42
5.4	Application de la Matrice Bleue-Verte aux différentes zones du campus	43
5.4.1	Résultats zone EST	43
5.4.2	Résultats zone NORD	46
5.4.3	Résultats zone SUD	47
5.5	Propositions de mesures d'amélioration	48
5.5.1	Solutions zone EST	49
5.5.2	Solutions zone NORD	53
5.5.3	Solutions zone SUD	56
6	Discussion	60
6.1	Qualités de la Matrice Bleue-Verte	60
6.2	Potentiels d'amélioration de la Matrice Bleue-Verte	61
6.3	Gestion du risque	62
7	Conclusions	64
8	Remerciements	65
9	Annexes	66
9.1	Les indicateurs et leurs niveaux d'adaptation	66
9.2	Guide d'utilisation de la Matrice Bleue-Verte	66
9.3	Infiltration	80
9.4	Rétention	81

9.5	Continuité écologique	81
9.6	Albedo	82
9.7	Mobilier urbain	82
9.8	Catalogue de solutions techniques	86
9.9	Plan de l'EPFL	103
9.10	Solutions zone EST	103
9.11	Solutions zone NORD	104
	Bibliographie	105
	Glossaire	109

Table des figures

2.1	Les températures et précipitations en Suisse aujourd’hui, modélisées par MétéoSuisse selon le scénario A1B [National Centre for Climate Services (NCCS), 2018]	3
2.2	Transition des infrastructures grises vers les infrastructures vertes dans le cas de la gestion des eaux pluviales [Taguchi et al., 2020].	5
2.3	Schéma montrant les bénéfices de différents aménagements bleus-verts [praja, 2019].	6
2.4	Schéma représentant la continuité écologique intégrant les habitats (<i>patch</i>), les corridors et les pas japonais (<i>stepping stone</i>) [Rhiannon Crain, 2015].	9
2.5	Schéma représentant les relations entre chaque problématique abordées dans le concept de ville-éponge.	10
3.1	Schéma représentant les différents états d’infrastructures bleue-vertes [Al, 2019]. . .	17
3.2	Pavés à joints serrés [Steine von Steinbach, 2018]	18
3.3	Pavés à joints écartés [SEPA, 2021]	18
3.4	Pavés gazon [Petty Son & Prestwich, 2021]	18
3.5	Courbes des hauteurs de précipitations H_p et hauteur d’eau de sortie du bassin de rétention H_e pour un temps de retour de 100 ans, sur la commune de Pully.	20
3.6	Détermination du volume de stockage nécessaire selon les différents cas de figure. . .	23
3.7	Les différentes étapes de qualification de la continuité écologique	24
3.8	Coupe transversale de bâtiments et la valeur des pixels associés à chaque classe de couverture. De gauche à droite respectivement : Un sol imperméable, un mur en béton ($> 50m$) et un toit imperméable; Un sol imperméable, un mur végétal ($> 50m$) et un toit imperméable; Un sol végétal, un mur végétal ($> 50m$) et un toit végétal.	26
3.9	Méthodologie afin de déterminer le plus court trajet.	26
3.10	Variation des niveaux d’adaptation des villes au changement climatique en fonction de l’albedo.	30
3.11	Variation des niveaux d’adaptation des villes au changement climatique en fonction de l’ombre.	31
3.12	Détermination du pourcentage global pour la quantité de mobilier.	32
3.13	Détermination du pourcentage global pour la qualité du mobilier.	33
4.1	Résumé des différentes solutions techniques, des mesures auxquelles elles correspondent et des problématiques auxquelles elles répondent.	36
5.1	Carte représentant la zone sud et son bassin versant.	39
5.2	Carte représentant la zone est et son bassin versant.	40
5.3	Carte représentant la zone nord et son bassin versant.	40
5.4	Carte représentant le bassin versant de la zone EST et tous les revêtements dont il est composé.	42

5.5	Extrait de la table d'attributs de la couche <i>Végétation</i>	43
5.6	Photographie des toits plats du CM, recouverts de graviers et panneaux solaires. ©Loé Maire	43
5.7	Photographie des terrasses végétales sur les plus vieux bâtiments du campus. ©Durabilité EPFL	43
5.8	Résultats de la Matrice Bleue-Verte appliquée au quartier EST.	44
5.9	Photographie de l'implantation des 50 arbres pour les 50 ans de l'EPFL. ©Durabilité EPFL	44
5.10	Photographie d'un arbre récemment implanté sur le campus. ©Loé Maire	44
5.11	Photographie de l'épaisseur du substrat sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire	45
5.12	Photographie de l'épaisseur du substrat sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire	45
5.13	Photographie du type de végétation sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire	45
5.14	Photographie du type de végétation sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire	45
5.15	Photographie du parking recouvrant une majorité de la zone NORD. ©Loé Maire	46
5.16	Photographie du type de végétation présent dans la zone NORD. ©Loé Maire	46
5.17	Résultats de la Matrice Bleue-Verte appliquée au quartier NORD.	46
5.18	Photographie du type de végétation présente dans la zone SUD. ©Loé Maire	47
5.19	Photographie du type de végétation présente dans la zone SUD. ©Loé Maire	47
5.20	Résultats de la Matrice Bleue-Verte appliquée au quartier SUD	47
5.21	Photographie du manque d'ombre dans la zone SUD. ©Loé Maire	48
5.22	Photographie des espaces ombragés artificiels sous le RLC. ©Loé Maire	48
5.23	Canalisation centrale parcourant toute l'avenue Piccard.	49
5.24	Vue en plan - Scénario 1.	50
5.25	Vue en plan - Scénario 2.	50
5.26	Plan de façade à façade pour le scénario 1 au niveau de la coupe 1.	50
5.27	Plan de façade à façade pour le scénario 1 au niveau de la coupe 2.	51
5.28	Plan de façade à façade pour le scénario 2 au niveau de la coupe 1.	51
5.29	Schéma de principe d'une toiture végétalisée et d'une toiture mixte végétation et panneaux solaires.	52
5.30	Diagramme en radar représentant les résultats de la matrice modélisée pour la situation actuelle de la zone EST ainsi que les scénarios 1 et 2 envisagés.	53
5.31	Vue en plan des aménagements sur le parking de la zone NORD.	53
5.32	Schéma de principe du parking de la zone NORD, pour le niveau d'adaptation 1.	54
5.33	Schéma de principe du parking de la zone NORD, pour le niveau d'adaptation 2.	54
5.34	Schéma de principe du parking de la zone NORD, pour le niveau d'adaptation 3.	55

5.35	Diagramme en radar représentant les résultats de la matrice modélisés sur le parking de la zone NORD seulement, pour la situation actuelle ainsi que les trois niveaux d'adaptation envisagés.	56
5.36	Scénario proposé - bassin de rétention.	56
5.37	Plan du profil du jardin pluvial de la zone SUD, au niveau de la coupe 1.	57
5.38	Plan du profil du jardin pluvial de la zone SUD, au niveau de la coupe 2.	57
5.39	Plan du profil du jardin pluvial de la zone SUD, au niveau de la coupe 3.	57
5.40	Schéma de principe du jardin pluvial	58
5.41	Image de référence du jardin pluvial	58
5.42	Scénario proposé - jardin pluvial et zone boisée.	58
5.43	Scénario proposé - zone boisée et mobilier urbain.	58
5.44	Diagramme en radar représentant la situation actuelle de la zone SUD et la situation projetée avec les nouveaux aménagements.	59
6.1	Pourcentage d'adaptation (100% = totalement adapté) en fonction du type de revêtement pour chaque indicateur.	60
9.1	Les limites des niveaux d'adaptation de chaque indicateur.	66
9.2	Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la station de Lausanne [Zeller et al., 1979].	81
9.3	Plan de l'EPFL.	103
9.4	Schéma de principe de l'ouvrage de sortie de la noue infiltrante.	103
9.5	Schéma de principe de l'ouvrage de sortie de la tranchée drainante.	103
9.6	Schéma de principe du réseau de canalisations des eaux claires à la sortie des ouvrages de rétention.	104
9.7	Profil de la tranchée drainante qui évacue les eaux du parking de la zone NORD. ©Loé Maire	104
9.8	Détail de la sortie de la tranchée drainante. ©Loé Maire	104

Liste des tableaux

2.1	Tableau indicatif de la capacité d'abattement en fonction de l'épaisseur du substrat par type de toiture [Nezeys, 2013].	8
3.1	Classification de l'indicateur E1 - Infiltration	18
3.2	Classification de l'indicateur E2 - Rétention	20
3.3	Classification de l'indicateur E3 - Stockage	23
3.4	Résistance des pixels en fonction du type de surface auquel ils sont affectés.	25
3.5	Classification de l'indicateur B1 - Continuité écologique	28
3.6	Classification de l'indicateur B2 - Diversité des milieux	30
3.7	Classification de l'indicateur C1 - Albedo	30
3.8	Classification de l'indicateur C2 - Ombre	31
3.9	Classification de l'indicateur C3 - Mobilier urbain	33
5.1	Dimensions des ouvrages bleus-verts installés dans la zone EST.	51
5.2	Dimensions de la tranchée drainante installée dans la zone NORD en fonction du niveau d'adaptation.	55
9.1	Coefficients de ruissellement selon le type de surface [Yang et al., 2021], [Etat de Fribourg, 2019], [Ville de Morges, 2020].	80
9.2	Coefficients de ruissellement optimaux selon l'affectation des parcelles	80
9.3	Albedo pour chaque revêtement [ICARE et al., 2012], [Les Services de Bordeaux Métropole, 2017].	82

Résumé

Similairement à la majorité des villes à travers le monde, les zones urbaines en Suisse sont fréquemment touchées par le changement climatique, notamment à travers les effets d'îlots de chaleur ou l'augmentation de la fréquence des inondations. Afin d'éviter que les villes ne deviennent invivables, les politiciens ont mis en place des Plans Climat où ils énoncent des stratégies et mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et adapter les villes aux effets du changement climatique. Toutefois, il y a un manque d'outils permettant d'évaluer le degré d'adaptabilité des villes et d'évaluer les mesures nécessaires à mettre en place pour améliorer leur résilience. BG Ingénieurs Conseils, étant une société de conseils en environnement, est intéressée par le fait de pouvoir offrir une évaluation complète à ses clients et aux villes qui ont une volonté de connaître leur degré d'adaptation au changement climatique et de développer des stratégies d'amélioration. Ainsi, cette étude relate de la mise en place d'un outil permettant d'évaluer la résilience des villes de manière simple et rapide. Cette Matrice Bleue-Verte, composée de huit indicateurs, est basée sur les piliers généralement présentés dans les Plans Climat : la gestion des eaux pluviales (réduction du ruissellement, réduction du débit de pointe, stockage et réutilisation de l'eau), biodiversité (maintien de la faune et de la flore dans les villes grâce à des milieux verts nombreux et diversifiés), confort (assurer des villes habitables malgré l'augmentation des températures et des autres dangers). Le cas d'étude appliqué au campus EPFL montre que la matrice élaborée permet de déterminer les aspects qui sont les plus urgents à améliorer. De plus, la matrice permet de modéliser chaque scénario de mesures d'améliorations afin de voir l'évolution des indicateurs.

Abstract

As all major cities, towns in Switzerland are already affected by climate change through urban islands effects or the increase of flood frequency. In order to prevent cities from being unlivable, politics set up Climate Plans where they map out directions of strategies and measures to reduce greenhouse gases emissions and adapt cities to the effects of climate change. However, there is a lack of tools to assess how far cities are from adaptation and how they can improve their resilience. BG Ingenieur Conseils as a consulting company is interested in being able to offer a complete assessment to cities willing to know their degree of adaptation and develop adjustment strategies. Thus, this study aims to establish a tool which could assess the resilience of cities in a straight, simple and accurate way. This Blue-Green Matrix, composed of eight indicators, is based on the three pillars generally present in Climate Plans : stormwater management (runoff reduction, peak-flow reduction, water storage and reuse), biodiversity (maintain fauna and flora in urban environment thanks to enough diverse and favorable green areas), comfort (ensuring comfortable cities despite rising temperatures and other hazards). The case study applied to the EPFL campus shows that the matrix allows to determine which aspect is the most urgent to improve. Moreover, each scenario of improvement measures can be easily modelled by the matrix in order to see the evolution of the indicators.

1. Introduction

1.1 Contexte et problématiques

De nombreuses études scientifiques ont démontré ces dernières années une évolution rapide et sans conteste du climat, avec une augmentation préoccupante du réchauffement climatique et des événements extrêmes. Par événements climatiques extrêmes sont sous-entendus les précipitations extrêmes, les fortes augmentations de température et les grandes sécheresses estivales. En Suisse, les effets du changement climatique sur la biodiversité, la qualité de l'eau, les glaciers ou l'habitabilité des zones urbaines par exemple sont déjà visibles. Dans ce contexte, et face à ce défi croissant, de nombreuses lois sont votées et de nombreux plans climats sont instaurés dans les villes, cantons et pays. En Suisse, la volonté d'atteindre zéro émission nette à l'horizon 2050 est le fil conducteur de cette transition [Conseil Fédéral, 2019].

Parmi les nombreuses zones déjà touchées par le changement climatique apparaissent les villes. Elles deviennent de plus en plus vulnérables face aux effets du changement climatique et de moins en moins viables pour les populations. Ceci est dû principalement à l'augmentation constante des surfaces imperméables, parallèlement à la diminution des espaces verts, à l'augmentation de la demande en eau et celle des émissions de gaz à effet de serre. Ces augmentations accroissent le nombre de problématiques en zone urbaine comme le risque d'inondation ou la création d'îlots de chaleur par exemple [Brears, 2018]. Face à ces risques croissants, il est devenu nécessaire d'adapter les villes au changement climatique. En réponse à ce défi, le principe de ville-éponge a été développé par le gouvernement chinois en 2013. En effet, au cours de ces dernières années la Chine a vu augmenter les impacts du changement climatique dans ses villes [Jia et al., 2015]. Les villes-éponges ont pour but d'intégrer une planification raisonnée de la gestion des eaux de pluie, de maintenir et favoriser la biodiversité dans les villes, tout en offrant une qualité de vie saine, agréable et durable aux riverains. Elles font donc de plus en plus l'objet de recherches scientifiques, et de nombreuses villes tendent à copier ce modèle pour certains de leurs quartiers.

BG Ingénieurs Conseils est une entreprise fondée en 1954 qui est actrice dans des projets de construction ou de rénovation dans le domaine de l'environnement, du bâtiment, de l'énergie et des infrastructures et transports. L'intérêt croissant des villes-éponges par de nombreuses communes est donc une occasion pour BG Ingénieurs de réaliser un projet d'innovation dans ce domaine et répondre à un réel besoin. L'entreprise souhaiterait pouvoir offrir à ses clients et aux communes une évaluation complète de leur degré d'adaptation au changement climatique et des solutions à mettre en place pour augmenter leur résilience.

1.2 Objectifs

Aujourd'hui, aucun outil ne permet d'évaluer la qualité d'une ville en termes de résilience face au changement climatique. Ainsi ce présent projet a pour but de développer un outil de quantification et qualification de l'adaptabilité des villes au changement climatique. Ayant pour but d'aider les communes et les collectivités à répondre aux objectifs climatiques, cet outil d'aide à la décision sera utilisé lors de la phase de pré-projet pour évaluer le niveau d'adaptation de la ville aux changements climatiques. Ainsi il est nécessaire que l'outil soit simple d'utilisation, rapide et précis dans son analyse. L'outil d'aide à la décision nécessite la mise en place d'indicateurs mesurés, précis, raisonnés et orthogonaux. Une méthodologie générale a été développée, puis appliquée à un cas d'étude concret sur le campus EPFL afin de l'améliorer, l'affiner et la valider. Une analyse détaillée du campus EPFL permettra d'apporter des pistes concrètes d'amélioration au niveau des infrastructures et surfaces du campus EPFL. En effet, bien que l'EPFL soit implantée en Suisse - qualifiée comme le château d'eau de l'Europe - et implantée sur les berges du lac Léman, une planification raisonnée de la gestion des eaux de pluie sur le campus permettrait de faire de l'EPFL une référence internationale en termes de durabilité.

Cette méthodologie dans son ensemble permet de déterminer les mesures d'adaptation au

changement climatique nécessaires à implanter dans une ville. Elle se base sur une revue littéraire importante, et sur les résultats de nombreuses études mathématiques déjà réalisées. En effet, de nombreux modèles mathématiques, utilisant de nombreuses variables et logiciels, existent déjà pour quantifier certains indicateurs. Toutefois, en tant que pré-projet, peu de données des diverses communes ne peuvent être obtenues et peu de logiciels ne peuvent être utilisés. Cette méthodologie se doit de fournir un résultat précis, obtenu de manière rapide, avec peu de données et de logiciels, et donc reproductible simplement d'une commune à une autre. En somme, cette méthodologie contourne les modèles mathématiques.

Ce présent rapport comporte tout d'abord une revue littéraire permettant de contextualiser ce projet et définir le concept de ville-éponge et les domaines qui lui sont liés. Puis la mise en place de la méthodologie sera expliquée. Finalement l'application de cette méthodologie à un cas pilote exposera la réflexion du diagnostic de l'état actuel à la proposition de solutions concrètes. Cette présente étude a donc pour but de répondre aux questions de recherches suivantes : Quelle méthodologie et données sont nécessaires pour mesurer la capacité d'un quartier à s'adapter au changement climatique ? Quels sont les indicateurs pertinents pour quantifier et qualifier la capacité de résilience d'un quartier ? Quelles infrastructures et mesures bleues-vertes faut-il planifier sur le campus EPFL pour améliorer sa capacité à s'adapter au changement climatique ?

1.3 Les parties prenantes

Plusieurs parties prenantes pourraient être intéressées par un tel outil. Les villes, communes et collectivités sont les premières entités potentiellement intéressées. Leurs différents services liés à l'eau, aux parcs et domaines, à l'urbanisme, aux infrastructures et aménagements urbains sont de plus en plus sensibles à cette question d'adaptation au changement climatique et réduction des émissions. Des entretiens réalisés avec différents services de la ville de Lausanne ont permis de comprendre que ces différents services, bien que sensibles, n'interfèrent que très peu entre eux. Un outil de gestion globale permettrait de leur offrir une vision globale, ainsi qu'un diagnostic global. Certains services ne font même pas de diagnostic avant de mettre des mesures en place, ils regardent simplement où il y a une opportunité d'amélioration plus qu'un réel besoin. Ainsi un diagnostic simple, rapide et précis pourrait leur être très utile. Finalement, cet échange avec plusieurs services a pu montrer aussi que la majorité d'entre eux sont en recherche d'un catalogue énumérant les solutions d'adaptation au changement climatique et leurs caractéristiques. Aujourd'hui ce même catalogue existe pour la réduction des émissions mais manque pour ce second volet.

D'autres parties prenantes peuvent être intéressées par ce type d'outil. Les entités privées, comme les promoteurs, peuvent avoir besoin d'un outil de diagnostic pour faire l'analyse préalable d'un nouveau quartier qu'ils prévoient de construire. Même si cette matrice a été réalisée dans le but d'adapter une ville déjà construite, elle peut être utilisée pour modéliser des scénarios en phase de planification. Finalement les usagers des villes et les associations d'habitants peuvent eux aussi être intéressés par une telle matrice et les résultats qui en ressortent.

2. Etat de l'art

2.1 Prévisions climatiques en Suisse en 2050

Le sixième rapport du GIEC publié il y a quelques mois énonce "sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et l'eau" [GIEC, 2021] (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Alors que c'était une supposition dans leur rapport de 1990, ce résultat est aujourd'hui entièrement démontré. En réaction à ce nouveau rapport, António Guterres, le Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies a déclaré qu'il est urgent de "financer l'adaptation et financer de la résilience" [Organisation des Nations Unies, 2021].

Depuis l'ère pré-industrielle, la température globale de la planète a déjà augmenté de 1,1°C. Concernant la Suisse, l'augmentation est plus haute que la moyenne globale avec une hausse des températures de plus de 2°C. En 2018, le National Centre for Climate Services (NCCS) a publié les scénarios climatiques CH2018 élaborés conjointement avec l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse) et le *Center for Climate Systems Modeling* de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich (C2SM). Les scénarios climatiques s'appuient sur l'évolution des températures mesurées entre 1864 et 2017 et décrivent les conséquences possibles avec différents scénarios d'émissions de gaz à effets de serre.

Deux scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) ont été envisagés : sans mesures de protection, donc avec les activités humaines qui se poursuivent de la même manière, et avec mesures de protection. Sans mesures de protection, les précipitations estivales pourraient être réduites de 45%, alors qu'elles le seraient de 20% si des mesures de protection étaient mises en place. Le risque d'inondations et de ruissellement sur 100 ans augmentera de 20% sans mesures de protection et de 5% avec mesures de protection. Finalement, une augmentation des températures en Suisse entre 3°C et 5°C est à prévoir sans mesures de protection alors que le scénario avec mesures de protection prévoit une augmentation de seulement 0,5°C à 2°C [National Centre for Climate Services (NCCS), 2018].

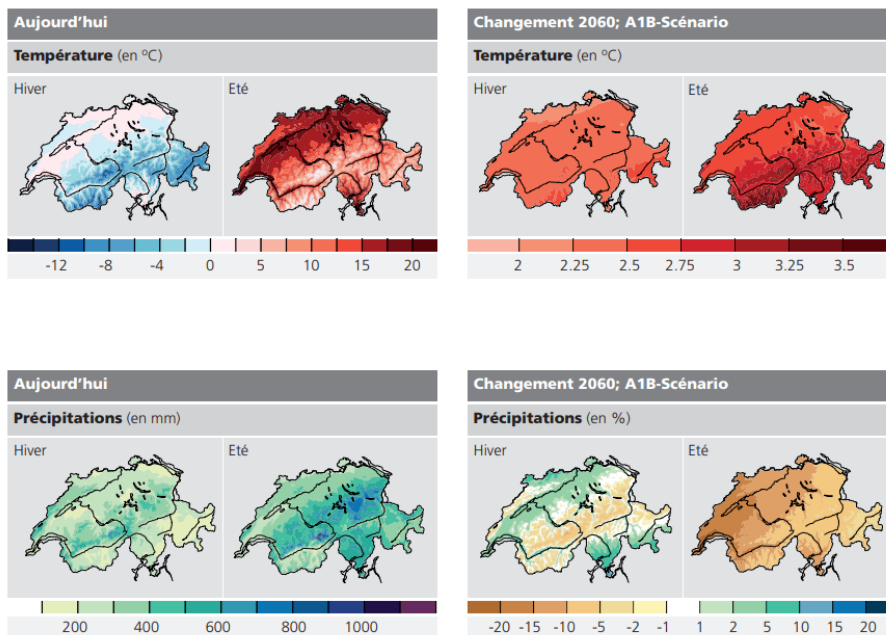


Figure 2.1: Les températures et précipitations en Suisse aujourd'hui, modélisées par MétéoSuisse selon le scénario A1B [National Centre for Climate Services (NCCS), 2018]

Qu'il s'agisse de la hausse des températures observées, des périodes de sécheresses et canicules plus fréquentes et plus longues ou d'une limite de la neige à plus haute altitude, les impacts du réchauffement climatique sont visibles en Suisse. Les changements climatiques impactent les régimes hydrologiques, la biodiversité et la société dans son ensemble [OFEV, 2020] (Office Fédéral de l'Environnement). Pour ces raisons, des mesures rapides et efficaces doivent être prises à la source (limitation des émissions de gaz à effet de serre) et limiter les impacts sur le terrain (adaptation au changement climatique).

Le choix de 2050 n'est pas anodin. Tout d'abord tous les scénarios du GIEC annoncent un réchauffement climatique d'ici là et leurs prévisions sont relativement semblables à cette période pour ne pas avoir à distinguer les différents scénarios dans l'étude de l'adaptation au changement climatique. Aussi en 2050, nombreux et nombreuses des lecteurs et lectrices seront témoins de l'évolution dans ces 30 prochaines années et ont donc un rôle à jouer. Finalement, la plupart des plans climats ont une échéance et des objectifs pour une vision jusqu'à 2050.

En regardant de façon plus spécifique les prévisions moyennes des températures et des précipitations en Suisse, les scénarios régionaux démontrent une augmentation des températures jusqu'à 1,8 en hiver et 2,7 en été. Ils ont été obtenus à l'aide de la combinaison de plusieurs modèles climatiques globaux et régionaux. Parallèlement, une légère augmentation des précipitations en hiver et une grande diminution de celles-ci en été sera observable en Suisse. En particulier en Suisse septentrionale, les précipitations augmenteront de 8% en hiver et diminueront de 17% en été par rapport à 1990. Similairement, les effets sur la biodiversité sont déjà visibles, notamment en milieu urbain. Le développement des zones urbaines et le changement de couverture des sols entraîne une perte de la diversité biologique, de la biocénose, d'écosystèmes, la perte de la qualité des sols [Organe consultatif sur les changements climatiques, 2007].

2.2 Plans d'adaptation au changement climatique en Suisse

Au cours des dernières années, les pays, cantons et villes ont chacun et chacune publié leur plan climat en voyant la nécessité d'agir face au changement climatique qui impacte déjà notre société et nos modes de vie. A travers ces plans climat, les gouvernements dévoilent leurs objectifs et leurs stratégies pour les atteindre afin d'anticiper et d'accompagner le passage à une société post-carbone. A travers les actions envisagées, les plans climats peuvent jouer un rôle majeur et apporter des bénéfices dans de nombreux domaines et donc améliorer la résilience des villes.

En Suisse les plans climats de chaque ville ont des objectifs semblables fixés par le Conseil d'Etat et l'Accord de Paris ratifié en 2015. Ceux-ci se veulent assurer la capacité d'adaptation du territoire au changement climatique, réduire les émissions de gaz à effet de serre de 50% d'ici à 2030 et enfin de contribuer à l'objectif zéro émission nette à l'horizon 2050 [Etat de Fribourg, 2021]. La politique Suisse se base donc sur deux principes : l'atténuation des gaz à effet de serre et l'adaptation au changement climatique. [Etat de Vaud, 2020b] Dans cette présente étude c'est l'adaptation des milieux urbains au changement climatique qui sera étudié. En effet, malgré l'augmentation des émissions et des mesures prises pour les atténuer, il est nécessaire de planifier des mesures dans le domaine de l'aménagement du territoire afin d'améliorer la capacité des villes à répondre au changement climatique.

2.3 Les villes éponges : une solution bleue-verte

Aujourd'hui les villes doivent faire face à une augmentation du changement climatique et donc des événements extrêmes de plus en plus violents et fréquents. Ainsi les zones urbaines doivent être repensées afin de devenir plus résilientes au changement climatique et parallèlement réduire leur empreinte carbone à l'aide d'infrastructures plus durables [Brears, 2018]. En 2013, le gouvernement chinois a mis en place l'initiative "Sponge City" (ville-éponge) afin de développer

une stratégie plus durable du contrôle des ruissellements urbains et de l'urbanisation. Ce principe de ville éponge cherche à se différencier de l'approche traditionnelle des écoulements rapides des eaux de pluies vers les canalisations ou en surface (infrastructures grises) pour une utilisation de procédés plus naturels, telle une "éponge résiliente" [Jia et al., 2015]. La figure 2.2 représente cette transition des infrastructures grises vers les infrastructures vertes dans le cas de la gestion des eaux de pluie.

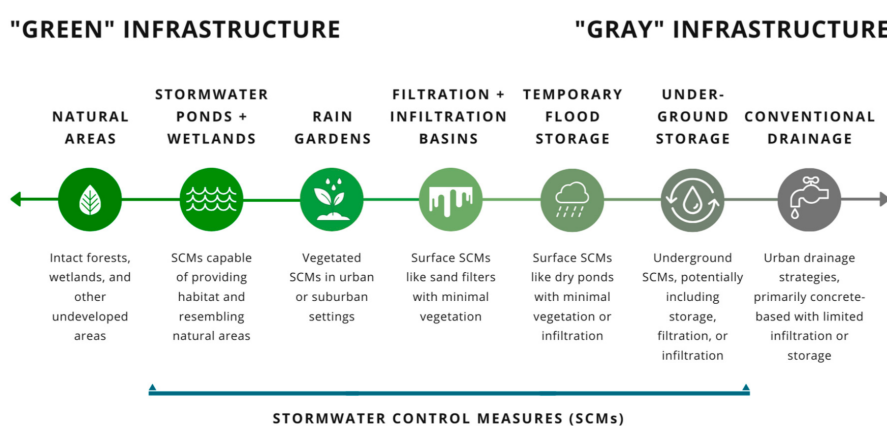


Figure 2.2: Transition des infrastructures grises vers les infrastructures vertes dans le cas de la gestion des eaux pluviales [Taguchi et al., 2020].

Appelés "infrastructures bleues-vertes", ces procédés plus naturels concilient deux domaines d'action. Le premier, le bleu, représente l'importance de la gestion physique de l'eau c'est-à-dire les fonctions hydrauliques. Le deuxième, le vert, fait le lien entre les fonctions hydrauliques urbaines et les systèmes de végétation urbains lors de l'aménagement des villes. Les infrastructures bleues-vertes offrent donc des bénéfices socio-économiques et permettent de conserver les fonctions des écosystèmes naturels [Wouters et al., 2016]. Depuis les années 2000 il est donc devenu évident que la planification durable des villes ne se réfère plus seulement aux espaces "verts" mais s'étend aux espaces "bleus" [Xiu et al., 2015].

Les infrastructures bleues-vertes et les villes-éponges de manière générale offrent donc de nombreux bénéfices dans des domaines variés. Elles permettent aussi bien de réduire les risques d'inondation et le débit de pointe des ruissellements que de réduire les îlots de chaleur, maintenir la biodiversité en milieu urbain ou améliorer la santé de l'Homme. La figure 2.3 montre les bénéfices de différentes infrastructures bleues-vertes. De manière générale les villes éponges permettent donc de restaurer le cycle naturel de l'eau et ses fonctions écologiques au sein d'une zone urbaine [Wang et al., 2021].

Ces nombreux bénéfices peuvent être qualifiés à l'aide d'indicateurs de performance. Par exemple, l'efficacité des mesures d'atténuation pour le risque inondation peut être évaluée par des réductions du débit de pointe. Souvent, les études et indicateurs de performance sont réalisés pour une problématique précise comme une problématique de température ou d'inondation par exemple [Gogate et al., 2016]. Peu d'études évaluent le domaine des villes-éponges et toutes les thématiques qui lui sont liées dans son ensemble et développent des méthodes de qualification de villes-éponges. En effet, de nombreuses études analysent la planification durable des villes à grande échelle sans évoquer d'indicateurs de qualification [Xiu et al., 2015] [Xiu et al., 2020]. D'autres analysent l'acceptabilité de la société vis-à-vis des villes-éponges et leurs bénéfices économiques comme par exemple [Wang et al., 2021]. Finalement, la plupart se focalisent sur les méthodes d'optimisation de mesures potentielles pour adapter une ville mais en suivant une seule problématique des villes-éponges à la fois ; par exemple la gestion de l'eau uniquement ou la gestion de la biodiversité seulement. En effet, souvent de nombreuses mesures pourraient être implémentées afin d'avoir une ville plus durable, mais toutes ne sont pas réalisables ou utiles à même échelle. Pour choisir quelles infra-

structures bleues ou vertes sont les plus optimales, ces études réalisent des analyses multi-critères [She et al., 2021], [Li et al., 2019], [Gogate et al., 2016] ou encore [Liang et al., 2020]. Aussi, la plupart des études utilisent des modèles mathématiques pour quantifier et donc qualifier les indicateurs. Pourtant, une méthodologie facilement applicable à diverses communes, comme un premier diagnostic de pré-projet demande peu de données et de relevés de mesures. Souvent peu de temps et d'argent est consacré à cette première partie. Donc un outil d'aide à la décision qui n'utilise pas de modèles mathématiques mais qui est capable de qualifier précisément l'adaptabilité d'une ville avec quelques informations simples est nécessaire.

En se basant sur les objectifs climatiques des villes et les bénéfices reconnus des villes éponges, trois thématiques apparaissent comme essentielles quant à la qualification des villes durables : la gestion des eaux de pluies, la biodiversité et le confort des espaces urbains. Chacune se réfère à un des objectifs de développement durable qui sont un cadre de référence pour la confédération [Etat de Vaud, 2020b]. D'autres thématiques sont courantes comme la mobilité ou l'énergie mais celles-ci relèvent plus de la réduction des émissions de gaz à effet de serre plutôt que de l'adaptation au changement climatique.

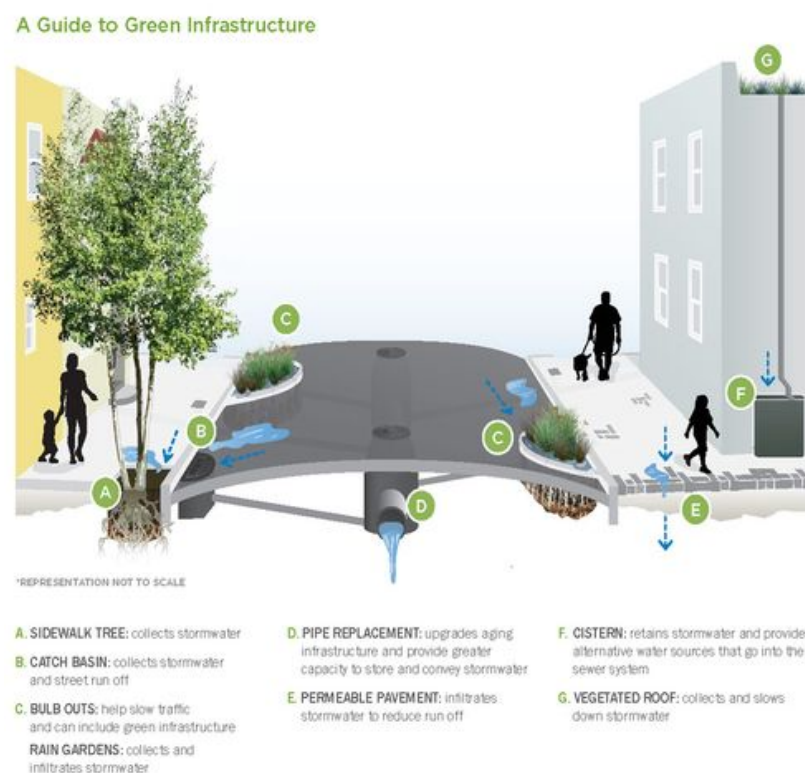


Figure 2.3: Schéma montrant les bénéfices de différents aménagements bleus-verts [praja, 2019].

2.3.1 Gestion des eaux de pluie

Le changement climatique a un effet direct sur la gestion de l'eau de pluie dans les milieux urbains. En effet, les risques d'inondations vont s'accroître dû à l'augmentation des événements de pluies extrêmes qui vont s'intensifier, ou aux événements de sécheresse qui seront répétitifs et plus longs. Cette augmentation du risque d'inondation est notamment dû à l'intensification de l'urbanisation et l'imperméabilisation de nombreuses surfaces qui diminuent l'infiltration et augmentent le ruissellement [Yang et al., 2021]. Dans les années 1980, les scientifiques ont découvert que les eaux stagnantes sont vecteurs de maladies, comme le choléra par exemple [SARP, 2019]. Pour cette raison, de vastes réseaux d'égouts ont été installés au fur à mesure de l'urbanisation

des espaces afin d'évacuer les eaux pluviales et les eaux usées en dehors des villes. Cependant cette technique de "tout à l'égout" s'avère très onéreuse au fur et à mesure que les villes s'étendent, et concentre la pollution dans l'eau qui est ensuite rejetée dans les rivières. Une première alternative a été de séparer les eaux usées (qui sont traitées en station) des eaux de pluie. Toutefois, ces eaux de pluie n'ont pas leur place dans les égouts car ce sont des eaux propres et lors de fortes pluies elles peuvent surcharger le réseau et entraîner des inondations [Vu, 2011]. Aujourd'hui des alternatives se développent pour une gestion plus optimisée, durable et locale des eaux de pluie, avec en particulier l'infiltration, la rétention, le stockage et de la réutilisation de l'eau de pluie. Ces alternatives sont clés dans le concept de villes-éponges et permettent de répondre à plusieurs problématiques telles que réduire la fréquence, la durée et le volume des eaux de pluies ruisselantes pour éviter les inondations fréquentes, protéger les valeurs environnementales, sociales et économiques des villes, assouvir de manière constante le besoin en eau des populations et améliorer les aménagements en zone urbaine [Brears, 2018].

Dans sa directive de gestion des eaux urbaines par temps de pluie le VSA recommande d'infiltrer en priorité si la qualité des eaux respecte les recommandations du lieu, puis en deuxième priorité déverser les eaux dans les eaux superficielles, et finalement évacuer dans les canalisations [VSA, 2019a]. Cette directive a été rédigée pour les événements climatiques moyens et non extrêmes, mais elle reste une bonne base pour les événements extrêmes. De plus, de nombreuses villes ne sont aujourd'hui pas encore adaptées aux événements moyens. Dans le concept de ville éponge, une notion complémentaire à l'infiltration est ajoutée : la rétention [Ma et al., 2020]. Ces deux paramètres peuvent être améliorés grâce au développement récent d'infrastructures appelées infrastructures bleues. L'infiltration de l'eau de pluie dans le sol dépend du type de revêtement. A l'aide de matériaux poreux comme les bitumes poreux ou les pavés engazonnés, les chaussées peuvent être plus perméables. D'autres matériaux utilisés déjà depuis longtemps sont perméables comme les pavés ou le gravier [Ville de Neuchâtel, 2004]. Toutefois la végétation reste le revêtement le plus infiltrant. De manière générale le coefficient d'infiltration de la végétation est maximal. Cependant une légère variation peut avoir lieu suivant l'épaisseur du substrat. Moins le substrat est épais, moins le sol sera efficace en termes d'infiltration. Pour cette raison, de la végétation en pleine terre sera favorisée afin d'assurer une infiltration maximale. De plus, lors de la mise en place d'une toiture végétale, le choix d'une large épaisseur de terre sera favorisée (appelée toiture intensive) face à une épaisseur plus faible appelée extensive. Toutefois, ces dernières restent les plus répandues parmi les toitures végétales. Le tableau 2.1 ci-dessous montre la hauteur de lame d'eau abattue en fonction de l'épaisseur du substrat. Si la capacité d'infiltration n'est pas suffisante, de la rétention est nécessaire en complément [VSA, 2019b]. Il existe deux types de rétention. La rétention artificielle (bassin de rétention, tranchées drainantes, etc.) et la rétention environnementale (étangs de rétention, noues, toitures végétalisées, jardins de pluie, etc.) [Gogate et al., 2016]. Afin de suivre le concept de ville éponge, la rétention environnementale est favorisée si possible car elle s'accorde plus aux critères des villes éponges que la rétention artificielle.

Parallèlement, la problématique de raréfaction en eau peut être améliorée en aménageant des systèmes de captage, stockage et réutilisation de l'eau. Toutefois cette solution est très encadrée par la loi. L'eau de pluie doit être captée principalement des toitures (exceptées celles recouvertes d'un revêtement en plomb ou amiante) car elle est habituellement considérée comme non polluée [OFEFP, 2000]. La faible teneur en substances lessivées de l'air et du revêtement du toit peuvent être dégradées par infiltration dans le sol. Ainsi, l'eau récoltée peut être réutilisée uniquement pour les sanitaires, laver le sol ou le linge, arroser le jardin et laver la voiture [Ecohabitation, 2013] [Service public, 2020] [zo2, 2021]. Le stockage et la réutilisation de l'eau permettrait aussi de ne pas utiliser de l'eau potable pour des usages non potable. En effet la chasse d'eau, l'arrosage, le lavage des voitures ou encore les machines à laver représentent 80 à 90% de la consommation totale d'eau dans les ménages [Du et al., 2019].

Table 2.1: Tableau indicatif de la capacité d’abattement en fonction de l’épaisseur du substrat par type de toiture [Nezeys, 2013].

Type de toiture végétalisée horizontale ou de jardin	Epaisseur minimale du substrat	Hauteur de la lame d’eau abattue (Equivalent en termes de pluie de projet d’une durée de 4 heures)
Extensive	5 cm	4 mm (2 semaines)
Extensive	10 cm	8 mm (2 mois)
Semi-intensive	15 cm	12 mm (3 mois)
Semi-intensive	20 cm	16 mm (6 mois)
Intensive - Jardin suspendu	30 cm	22 mm (1 an)
Intensive - Jardin suspendu	50 cm	32 mm (3 ans)
Intensive - Jardin suspendu	80 cm	38 mm (5 ans)
Pleine terre	∞	48 mm (10 ans)

2.3.2 Biodiversité

Face à l’extension continue des villes et de leur densification, une certaine partie de la biodiversité a disparu des zones urbaines ou des périphéries des zones urbaines. A l’inverse, les nouveaux espaces verts créés en ville ou les espaces semi-naturels le long des infrastructures de transport (appelés ”végétation rudérale”) ont permis l’implantation de nouvelles espèces en milieu bâti. Face à cette disparition des espèces indigènes et au développement des espèces invasives, l’Office Fédéral de l’Environnement déclare élevée l’importance des plans d’action pour les milieux bâtis dans la région plateau [OFEV, 2013].

Aujourd’hui l’urbanisation constante, l’imperméabilisation des sols et donc la diminution de la quantité de milieux verts accroît fortement la fragmentation de ces espaces verts. Cette perte de connectivité effectue une forte pression sur la biodiversité. Les lieux de reproduction, de vie, ou de nourriture se retrouvent séparés par des axes de communication ou de nombreux bâtiments [OFEV, 2013]. Ce morcellement des milieux de biodiversité crée des méta populations d’espèces fauniques et floristiques isolées spatialement et donc des extinctions locales fréquentes. Des processus de colonisation ou des flux migratoires peuvent avoir lieu entre les parcelles d’habitats, mais ceux-ci dépendent à la fois de la capacité des espèces à se disperser mais aussi de la connectivité du paysage [Kindlmann et al., 2008]. La présence de biodiversité en milieu urbain dépend donc de l’activité humaine, des choix des matériaux et procédés de construction ou des changements rapides d’affectation de parcelles. Pour ces raisons, la nécessité de planifier et d’entretenir une continuité des espaces verts en milieu urbain en créant des surfaces de compensation écologique est primordiale [OFEV, 2013].

Il existe deux types de connectivité de paysage : la connectivité structurelle, et la connectivité fonctionnelle. La connectivité structurelle est basée uniquement sur la physique du paysage, comme par exemple la taille et la forme des habitats ou la distance qui les sépare. Elle est facilement quantifiable à l’aide de systèmes d’information géographique mais n’est pas forcément adéquate dans toutes les analyses car elle ne considère pas de données écologiques, comme la dispersion des espèces dans le paysage. Son intérêt pour les analyses écologiques est par exemple limité [Fu et al., 2010]. En revanche, la connectivité fonctionnelle reflète de façon plus réaliste les déplacements des espèces en considérant leur réaction à la structure et composition du paysage. En effet, elle prend en compte des données sur la capacité de dispersion des espèces, les éléments qui facilitent ou non leur dispersion ou encore la distance euclidienne entre les habitats [Rochat, 2014]. Ce sera donc cette connectivité qui sera utilisée dans cette méthodologie.

Des éléments ponctuels peuvent renforcer la connectivité entre les habitats. Les corridors

écologiques ou encore les pas japonais ("stepping stones") sont des éléments paysagers linéaires ou étroits qui relient les habitats au sein d'une matrice [Ferland, 2015]. La figure 2.4 est un schéma représentant ces différents éléments formant la continuité écologique.

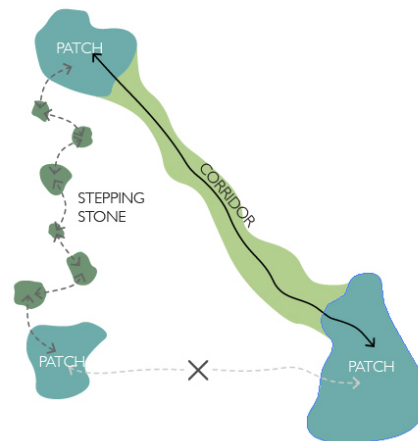


Figure 2.4: Schéma représentant la continuité écologique intégrant les habitats (*patch*), les corridors et les pas japonais (*stepping stone*) [Rhiannon Crain, 2015].

La protection des anciens espaces verts et le développement de nouveaux espaces comme les toitures végétalisées, les bacs de plantation, les façades végétalisées, des rues boisées, ou encore les voies de tramway végétalisées sont essentiels au maintien de la biodiversité en milieu urbain et à la protection des espèces rares. Ils agissent comme corridors ou pas japonais. En addition à la continuité des milieux, la diversité de ceux-ci et des aménagements adaptés aux espèces cibles sont nécessaires à la survie de la biodiversité en milieu urbain. En effet, la végétation des espaces verts urbains a tendance à être moins hétérogène et complexe que la végétation naturelle. Des pelouses vertes tondues régulièrement ne comportent aucun bénéfice pour certains types de faune. Les papillons ou insectes pollinisateurs par exemple ont besoin de pré ou espaces peu tondues, avec des plantes indigènes, diversifiées et avec de la hauteur. Les amphibiens vont préférer les milieux verts humides, donc autour des étangs ou des marres [Ferland, 2015]. Finalement, la présence d'éléments structurants ces milieux est nécessaire pour assurer des abris, des lieux de reproduction et d'alimentation aux espèces. Par exemple des murs en pierre naturelle, des tas de bois, de la litière, des branches mortes à l'ombre et au soleil, des niochirs, ... sont autant d'éléments structurant les milieux [Ville de Sion, 2017]. En somme, une grande diversité structurelle de la végétation locale a un effet positif sur la diversité des oiseaux, des arthropodes, et de tout type de faune en milieux urbains [Ferland, 2015].

2.3.3 Confort

L'augmentation de la température globale à la surface de la Terre est accentuée dans les zones urbaines. Appelée "îlot de chaleur", cette augmentation représente la différence de température entre le milieu urbain et les zones rurales environnantes [Voogt et al., 2002].

Aujourd'hui il y a un grand intérêt de la part du public en ce qui concerne l'aménagement et la qualité des espaces urbains et le fait qu'ils puissent contribuer à la qualité de la vie générale dans les villes [Nikolopoulou et al., 2006]. Des études ont montré que la chaleur et les conditions de confort en milieu urbain affectent la façon dont les habitants utilisent l'espace extérieur. La présence de soleil et des températures plutôt chaudes seraient des facteurs importants dans l'utilisation de l'espace. Un inconfort n'est pas forcément négatif si l'utilisateur avait anticipé que cet inconfort est pour une courte durée (par exemple le temps de passer d'un bâtiment à un autre en hiver). C'est pourquoi il est plus intéressant de regarder le confort des usagers sur un plus long terme,

par exemple lors de leurs activités, de leurs moments de pause, ... En effet, un usager va choisir de s'asseoir au soleil ou à l'ombre dépendant du temps qu'il a. De manière générale, les usagers vont faire une longue pause (50min) dans un espace offrant de l'ombre et du soleil, et une pause plus courte (16min) dans un espace offrant que du soleil. De plus, une zone où on est contraint d'attendre un ami ou d'y passer va entraîner plus de réaction d'inconfort comparé à une zone où on a choisi d'y aller pour passer du temps. Il est donc nécessaire de faire attention lors de l'étude du confort des usagers car une partie de leur appréciation peut être subjective ; leurs sensations peuvent dépendre de paramètres physiques mais aussi psychologiques [Nikolopoulou et al., 2003].

Afin d'avoir un rôle sur les îlots de chaleur, des mesures ont été proposées ces dernières années. La première préoccupation des usagers en été est l'ombrage. Sur un projet où il n'est plus possible de jouer sur la hauteur des bâtiments ou l'orientation des places, la végétation est alors une alternative qui peut déjà avoir un effet important [Nikolopoulou et al., 2003]. En effet, en plus de jouer un rôle d'ombrage, la végétation entraîne un phénomène d'évapotranspiration qui réduit la température de l'air [Grilo et al., 2020]. Aussi, parmi toutes les techniques possibles au niveau des matériaux, jouer sur l'albedo semble être le paramètre le plus efficace. Grâce à leur grande capacité à réfléchir le rayonnement solaire, les matériaux à fort albedo permettent de rafraîchir les milieux extérieurs [Lee et al., 2018]. Toutefois au-delà d'une certaine valeur trop élevée l'albedo peut avoir un effet. En effet dans son guide, la ville de Lille recommande un albedo entre 0.3 et 0.8. Au-delà de 0.8 un risque d'inconfort pourrait apparaître dû à une trop forte réflexion [Ville de Lille, 2021].

Aussi, le phénomène d'îlots de chaleur a un impact direct sur la santé de la population. De nombreuses études ont démontré que la présence de végétation dans les villes et la proximité aux infrastructures vertes [Jerome et al., 2019] améliore la santé et le bien-être de la population en réduisant le stress et améliorant les fonctions cognitives, le bien-être psychologique et physique [Keniger et al., 2013].

2.3.4 Infrastructures bleues-vertes : de multiples fonctions et bénéfiques

Les trois thématiques présentées précédemment, sont en réalité dépendantes les unes des autres. Les différentes problématiques qui peuvent être améliorées par des infrastructures bleues-vertes sont liées les unes aux autres ; une infrastructure peut avoir des bénéfices multiples touchant différentes catégories. Dans la partie 4 les multiples fonctions de chaque infrastructure seront présentées. Dans la figure 2.5 ci-dessous, les liens entre chaque problématique sont représentés. Les traitillés montrent les liens indirects entre chaque problématique.

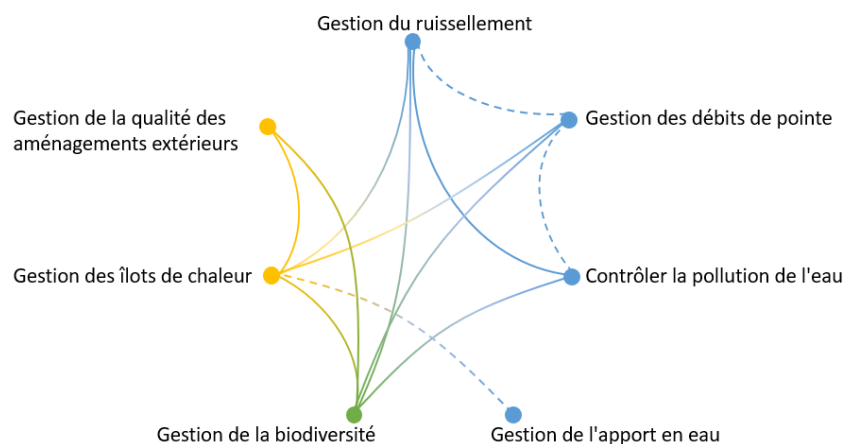


Figure 2.5: Schéma représentant les relations entre chaque problématique abordées dans le concept de ville-éponge.

Par exemple, la mise en place de revêtements poreux permet dans un premier temps d'augmenter le drainage et l'infiltration, donc de réduire le ruissellement des eaux pluviales [Chu et al., 2019], [Andersen et al., 1999]. Lors de l'infiltration de l'eau, la pollution est retenue par le revêtement poreux. L'eau est alors filtrée par la couche de sol biologiquement active [OFEFP, 2000]. De plus, de par leur capacité à absorber l'eau, ces chaussées perméables ont un taux d'évaporation de 16% supérieur aux chaussées imperméables [Starke et al., 2011]. Parallèlement, il a été démontré que ces revêtements jouent un rôle sur la température des villes. Les surfaces végétales permettraient de réduire drastiquement la température, en comparaison à des revêtements en asphalte [Herb et al., 2008]. [Coccolo et al., 2018] et [Grilo et al., 2020] montrent le potentiel en termes de réduction de chaleur grâce à des revêtements "verts" plutôt que "gris". D'après [Grilo et al., 2020], même des petites surfaces de végétation peuvent réduire la température jusqu'à 1-3°C et augmenter l'évapotranspiration de 2-8%. Ainsi, de part leur effets sur la température et l'évapotranspiration, les revêtements perméables permettent de réduire les effets d'îlots de chaleur. Finalement, d'après [Ville de Neuchâtel, 2004] les revêtements poreux créent et offrent de nouveaux micro-habitats pour la biodiversité.

Un deuxième exemple qui pourrait être mentionné est celui des toitures végétalisées. En effet, celles-ci ont non seulement un effet de rétention des eaux pluviales qui est fonction de l'épaisseur du substrat comme mentionné au paragraphe 2.3.1 [Berndtsson, 2010], mais elles permettent aussi la création de milieux verts favorables pour la biodiversité. Ces milieux en hauteur, avec de la végétation adaptée à des conditions météorologiques très diverses et à l'abri des Hommes sont un repère pour de nombreuses espèces. Cet apport de végétation en milieux urbains augmente par ailleurs l'évapotranspiration et donc apporte de l'humidification et de la fraîcheur dans les villes. Pour cette même raison, les toitures végétales peuvent augmenter l'efficacité des panneaux solaires. Quant à ces derniers ils peuvent apporter ombre et diversité de milieux aux surfaces végétales. Ainsi, des bénéfices réciproques entre ces deux installations montrent l'effet positif de l'aménagement conjoint des panneaux solaires et de la végétation sur les toitures [Ville de Lausanne, 2019]. Finalement les toitures végétalisées apportent d'autres bénéfices comme la purification de l'air ou encore l'isolation thermique des bâtiments qui ne rentrent pas dans le cadre de cet étude [Ville de Lausanne, 2019], [Seidl et al., 2013].

Le cas des arbres sera le dernier exemple d'aménagement multifonctionnel mentionné. En effet celui-ci est très intéressant car il dépend de la manière dont il a été implanté. L'espace vital de l'arbre en ville est très souvent inexistant. De par l'imperméabilisation des surfaces et le besoin de gagner de l'espace au sol les arbres sont très souvent plantés dans des sols peu adaptés à leurs besoins et avec peu d'espace. Leurs fonctions bénéfiques sont donc entravées. Ainsi le concept de fosses de Stockholm a été développé. Celles-ci assurent un espace vital à l'arbre composé d'un volume de plantation nécessaire et d'une distance minimale entre le tronc et les premières installations urbaines [Björn Embren, 2017]. Ainsi de part leur substrat naturel et la porosité du milieu créé par les racines des arbres, ces fosses permettent une grande infiltration. De plus, la canopée apporte de l'ombre, un habitat pour la faune, une diminution de la température dans les villes et une augmentation de l'évapotranspiration [Grilo et al., 2020].

Tout comme les revêtements poreux ou les toitures végétalisées, plusieurs autres solutions ont des fonctionnalités multiples comme celles-ci.

En parallèle de ces bénéfices environnementaux principaux, les infrastructures bleues-vertes ont des bénéfices secondaires au niveau économique et social. En effet les mesures d'adaptation au changement climatique permettent de renforcer la capacité de la nature à fournir de multiples services écosystémiques, et donc en retour offrent une meilleure qualité de vie pour la population. Économiquement les coûts de construction, installation et maintenance des infrastructures grises sont plus élevés et elles ont besoin de plus de maintenance comparé à un système plus résilient et autonome tel que les infrastructures vertes. Socialement les infrastructures vertes offrent aussi un lieu de récréation qui est en plus accueillant, vert, de bonne qualité et agréable en termes de paysage. En somme elles améliorent la qualité des quartiers urbains [Brears, 2018]. Finalement ces

infrastructures peuvent avoir un effet sur la thermique des bâtiments en réduisant la consommation énergétique. Par exemple les toitures végétalisées et l'implantation d'arbres dans les rues apportent de la fraîcheur aux bâtiments en été [Ville de Sion, 2017].

2.3.5 Un aperçu général des infrastructures bleues-vertes à travers le monde

C'est en Chine que ces infrastructures ont fait l'objet d'études et de tests en premier lieu, après les nombreux problèmes de gestion des eaux en milieux urbains qu'ils ont connus. Ainsi à partir de 2015, la Chine a mis en place 30 projets pilotes de villes-éponges comme à Pékin, Shanghai, Xiamen ou Shenzhen [Wang et al., 2018], [Xia et al., 2017], [Ma et al., 2020], [Chan et al., 2018]. Par la suite de nombreuses villes en Europe, aux Etat-Unis ou encore en Australie ont suivi [Wang et al., 2018].

En Allemagne les infrastructures les plus répandues sont les noues et les tranchées d'infiltration. La France est plus focalisée sur l'installation de bassins de rétention et de revêtements poreux composés de réservoirs [Deutsch et al., 2003]. Dans les pays du nord comme la Suède et Danemark les étangs de rétention et les noues sont favorisés car ils ont un effet supplémentaire de dépollution des eaux [Deutsch et al., 2003], [Sandström, 2002]. Dans les pays du sud de l'Europe comme la Grèce, le Portugal, l'Italie ou l'Espagne, l'utilisation d'ouvrages bleus-verts est limité mais tendent à être de plus en plus d'actualité dû à des populations de plus en plus conscientes du changement climatique [Deutsch et al., 2003].

3. Méthodologie de quantification et qualification du degré d'adaptabilité d'une ville : la Matrice Bleue-Verte

3.1 Hypothèses du projet

Mesurer l'adaptation au changement climatique implique d'utiliser des données en adéquation avec cette notion d'évolution du climat. En 2050, l'augmentation des températures extrêmes et de la raréfaction de l'eau seront principalement marquées pendant la saison estivale. Pour les précipitations extrêmes il est plus difficile de déterminer exactement à quelle saison elles seront les plus importantes mais dans tous les cas elles vont augmenter au cours des prochaines années [National Centre for Climate Services (NCCS), 2018]. Dans cette optique, la méthodologie sera implémentée sur la base de données estivales, pour les 3 mois d'été : juin, juillet et août.

Ainsi, dans le cas de la raréfaction de l'eau, les précipitations moyennes mensuelles en été en 2050 seront utilisées afin de quantifier la diminution en eau par rapport à aujourd'hui. Pour la température, les données moyennes mensuelles en été en 2050 seront utilisées. Cependant, aujourd'hui aucun modèle physique ne permet de prévoir les précipitations extrêmes selon des temps de retour par rapport à 2050. Donc pour les événements extrêmes les précipitations modélisées aujourd'hui avec un temps de retour de 30 ans seront utilisées. Les données climatiques proviennent des prévisions climatiques de MétéoSuisse suivant le scénario A1-B : augmentation des émissions de gaz à effet de serre jusqu'en 2050, puis léger déclin jusqu'en 2100.

De plus ce projet se concentre sur l'espace extérieur en milieu urbain, donc les sols et le contour du bâti ; et non pas les transferts énergétiques entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments par exemple.

3.2 Identification des indicateurs

Dans une méthodologie, le choix des indicateurs doit suivre certains critères afin d'assurer leur pertinence et leur orthogonalité. Ces critères sont [Desrosières, 2003] :

- la pertinence : il doit y avoir adéquation entre l'outil et les besoins de l'utilisateur ;
- la précision : une proximité entre la valeur estimée et la vraie valeur est nécessaire ;
- l'accessibilité et la clarté : les données statistiques utilisées doivent être accessibles et leurs formes doivent être claires pour les instances décisionnaires ;
- la comparabilité : les données doivent être comparables ;
- la cohérence : de la méthode de standardisation des données et des interprétations que ces données entraînent.

La littérature scientifique et les Plans Climat émis par les villes ont permis d'analyser les trois thématiques principales des villes éponges et des indicateurs clés à chaque thématique qui permettent de mesurer l'adaptation des villes au changement climatique.

En ce qui concerne la gestion des eaux de pluie en milieu urbain, les indicateurs doivent qualifier et quantifier des problématiques différentes : la diminution du risque d'inondations, la diminution du débit de pointe et l'apport régulier en eau en période de fortes chaleur [Etat de Vaud, 2020b]. Le VSA préconise d'infiltrer et retenir l'eau en priorité [VSA, 2019b]. Même si les valeurs préconisées par le VSA ont été dimensionnées pour des événements de pluie moyens, la méthodologie reste une bonne base pour émettre des indicateurs et des priorités de mesures pour adapter une ville en termes de gestion des eaux de pluie. Afin d'atténuer le risque d'inondations l'infiltration locale

de l'eau de pluie dans les sols permet de réduire la quantité d'eau ruisselante et sera donc un premier indicateur [Nehls et al., 2020]. Le débit de fuite d'un bassin versant peut être atténué grâce à des systèmes de rétention environnementaux ou artificiels [Li et al., 2019]. Cependant, si il est réalisable d'installer de la rétention environnementale, celle-ci sera favorisée face à de la rétention artificielle. Finalement, la problématique de la raréfaction croissante de l'eau dû au changement climatique nécessite de collecter et stocker l'eau de pluie pour pouvoir la réutiliser par la suite.

La thématique de la biodiversité est difficile à appréhender. Depuis des années, chercheurs et chercheuses étudient la biodiversité en milieu urbain afin de comprendre ce qui est bénéfique pour son maintien dans les villes. Aujourd'hui il est encore difficile d'énoncer la quantité de végétation nécessaire au maintien de la biodiversité en milieu urbain. Toutefois, des paramètres sont déjà connus et importants. Le premier indicateur est la connectivité des espaces verts en milieu urbain afin de garantir le déplacement et la reproduction de la faune et la flore. Aussi, il est important d'avoir une diversité dans les milieux verts (gazon, prairie non fauchée, potagers, ...) et dans les éléments structurants (tas de bois, tas de pierre, ...) [Ville de Sion, 2017]. Toutefois il est difficile de quantifier la quantité d'éléments structurants nécessaires au bien être de la biodiversité. Pour cette raison seule la diversité des milieux verts sera gardée comme indicateur.

Finalement, mesurer le confort d'une ville semble primordial dans l'étude de l'adaptation des villes au changement climatique, notamment avec le phénomène grandissant d'îlots de chaleur. Cette notion dépend de paramètres tels que l'ombre et l'albedo qui sont des mesures phares dans l'adaptation des villes aux fortes températures. Pour cette raison ce seront deux indicateurs. Finalement le confort en termes d'infrastructures sera abordé afin d'analyser si la quantité des aménagements extérieurs est suffisante, et surtout si leur qualité répond toujours aux besoins des usagers.

Ainsi, en résumé les indicateurs sélectionnés pour chaque thématique sont :

- Gestion des eaux pluviales :
 - o Infiltration
 - o Rétention
 - o Stockage
- Biodiversité :
 - o Connectivité écologique
 - o Diversité des milieux
- Confort urbain :
 - o Albedo
 - o Ombre
 - o Mobilier urbain

Les indicateurs qui n'ont pas été gardé dans la méthodologie

Au cours de la réflexion du choix des indicateurs, certains ont été envisagés puis retirés de l'outil pour diverses raisons :

Pleine terre : La pleine terre et donc l'épaisseur du substrat joue un rôle important dans la capacité d'un sol végétal à absorber une certaine quantité d'eau de pluie, donc dans l'infiltration. Ainsi il ne sera pas un indicateur à part entière mais sera un paramètre pris en compte après avoir évalué la matrice, lors de la mise en place de solutions possibles.

Présence d'espèces indigènes et exotiques : L'une des priorités des villes est de protéger les espèces indigènes et limiter l'implantation d'espèces exotiques. Cependant il est très difficile d'envisager de recenser les différentes espèces pour ces deux potentiels indicateurs pour une

méthodologie comme celle-ci. De plus, ce qui est important pour le maintien de la biodiversité dans un espace est la présence de milieux favorables à son développement et son implantation. Pour cette raison des indicateurs portés sur la quantité et qualité des milieux verts favorables à la biodiversité ont été privilégiés.

Température : La température est un critère important dans le confort des usagers en milieu urbain. Cependant ce critère est défini par le concept d'îlot de chaleur lorsqu'il est étudié en milieu urbain. Ce critère dépend de beaucoup de paramètres. Le principal est le rayonnement solaire, ce sur quoi l'Homme ne peut pas avoir d'impact à petite échelle et en termes d'adaptation au changement climatique. Cependant la température et donc le phénomène d'îlots de chaleur peut être atténué à l'aide de changements dans des paramètres microclimatiques tels que l'albedo ou l'ombre. Ce sont ces derniers qui seront alors utilisés comme indicateurs.

L'évapotranspiration (ETP) : L'ETP sera considérée comme un paramètre d'entrée et non comme un indicateur car elle joue un rôle important comme paramètre pour divers indicateurs. Principalement elle permet de quantifier le besoin en irrigation des plantes et donc le volume de stockage d'eau nécessaire. De plus l'ETP accroît le confort des Hommes en rafraîchissant l'atmosphère, cependant à nos latitudes l'ETP n'est pas réellement un problème.

La pollution des eaux de pluie : Cette notion est importante car elle est régit par une loi et permet d'énoncer si l'infiltration est possible. C'est pourquoi elle sera un paramètre à prendre en compte après l'analyse des résultats de la matrice, au moment où des solutions voudraient être proposées. Elle ne sera donc pas un indicateur à part entière.

Le volume des canalisations : Bien que les canalisations jouent un rôle dans la rétention des eaux de pluie, le concept de ville-éponge n'est pas en faveur de développer les infrastructures grises, au contraire. Donc le réseau de canalisation actuel sera pris en compte dans le dimensionnement du volume de rétention actuel, car il sera toujours présent et utilisable dans les années à venir, mais ce ne sera pas un indicateur à part entière. Le but n'est pas d'accroître le réseau de canalisation.

Rétention artificielle et rétention environnementale Ces deux indicateurs ont dans un premier temps été ajoutés séparément, avant d'être regroupés sous un même indicateur. En effet la notion de ville bleue-verte tant à vouloir favoriser la rétention environnementale par rapport à la rétention artificielle. Toutefois cette rétention artificielle permet quand même de répondre à la problématique des inondations. De plus, aujourd'hui les limites légales permettant de quantifier la rétention évoquent la rétention dans son entièreté. Ainsi l'indicateur de rétention regroupant ces deux notions a été créé. Dans le chapitre 6 ci-dessous cette problématique sera développée plus en détails.

Éléments structurants Afin d'assurer la sédentarité d'espèces cibles, des éléments structurants les milieux verts sont nécessaires afin d'apporter de la diversité, des abris, de l'ombre et des sources de nourriture. Ces éléments peuvent être des bois morts, des tas de pierre, des tuiles, des souches d'arbres, ... Toutefois il est extrêmement difficile de quantifier la quantité nécessaire à la biodiversité. Ainsi ces éléments ne formeront pas un indicateur mais feront partis des recommandations à mettre en place.

3.3 Données nécessaires à l'analyse des indicateurs

- Une visite de terrain est toujours nécessaire en début de projet. Elle permet de bien visualiser la zone d'étude, aller voir les ouvrages de rétention, de stockage, les revêtements des surfaces, les différents types de végétation, les zones ombragées par l'environnement ou par des installations artificielles, etc. Cette visite de terrain peut être complétée par l'utilisation de Google Earth ou tout autre outil de visualisation satellite, tout au long du projet.
- Un fichier géoréférencé de la zone étudiée pour pouvoir mesurer les aires des différentes surfaces (revêtements, végétation, etc.).
- Un fichier géoréférencé mentionnant les revêtements des surfaces.

- Un fichier géoréférencé 3D. Celui-ci permettra de connaître la hauteur des bâtiments et les aires des façades notamment pour déterminer l'albedo.
- Un plan des canalisations des eaux claires et leur élévation.
- Une liste des ouvrages de rétention dans les bassins versants étudiés ainsi que leur dimensions et caractéristiques selon les informations enregistrées. Ce fichier permettra de connaître le volume et type de rétention actuelle. Une visite de terrain peut compléter ces informations.
- Une liste des ouvrages de stockage d'eau et informations concernant la potentielle réutilisation de l'eau de pluie dans les bassins versant étudiés. Ce fichier permettra de connaître les ouvrages de stockage d'eau de pluie actuels.
- Les résultats du sondage du confort de la population dans la zone étudiée et la qualité et quantité du mobilier urbain.

3.4 Échelle de la Matrice Bleue-Verte

Afin de quantifier et qualifier chaque indicateur, un choix raisonné et proportionné d'échelle doit être réalisé. En se basant sur le système modulaire gradué (SMG) de l'OFEV (une méthodologie similaire pour évaluer l'état des cours d'eau), une échelle à quatre couleurs sera utilisée : vert - jaune - orange - rouge, signifiant respectivement un niveau d'adaptation élevé - moyen - faible - très faible.

L'état vert témoignera d'un niveau d'adaptation élevé de la ville au changement climatique. C'est l'état optimal de la zone urbaine où les risques seraient maîtrisés. Au-delà, l'état idéal serait évoqué, c'est-à-dire une gestion totale des risques résiduels. Il y a une nuance entre un état optimal et un état idéal. En effet un état idéal correspondrait au bâti en pleine campagne, non réaliste lors de l'étude d'une zone urbaine. Le concept de ville-éponge se doit de garder les propriétés, activités et aménagements caractéristiques d'une ville. L'adaptation au changement climatique ne doit pas se faire au détriment de l'habitabilité d'une ville, au contraire il doit apporter une meilleure qualité de vie. Donc de manière générale, l'affectation d'une parcelle à une fonction doit le rester. C'est pourquoi dans cette méthodologie le choix a été fait de garder l'état optimal comme état de référence, lorsque le système peut être dépassé par les événements extrêmes mais reste gérable, donc maîtriser le risque. La différence entre cette maîtrise du risque et cette gestion des risques résiduels sera traitée de manière plus approfondie dans la partie 6.3. L'état d'adaptation très faible représente une ville pas du tout adaptée et résiliente aux changements climatiques, subissant tout événement extrême et pas agréable à y habiter.

Sur la figure 3.1 ci-dessous, la nuance entre un état idéal gérant totalement les risques résiduels (représenté par le schéma "Green") et un état optimal maîtrisant les risques (représenté par le schéma "Hybrid") est bien représentée. Le schéma *Hybride*, optimal laisse en place les canalisations déjà installées et l'affectation des parcelles tout en mettant en place des installations bleues-vertes de gestion durable des eaux de pluies, donc le niveau d'adaptation élevé de la matrice. Le schéma *Green* représente un état naturel, idéal. Le schéma *Grey* représente lui un niveau d'adaptation très faible où le système est majoritairement composé d'infrastructures grises.

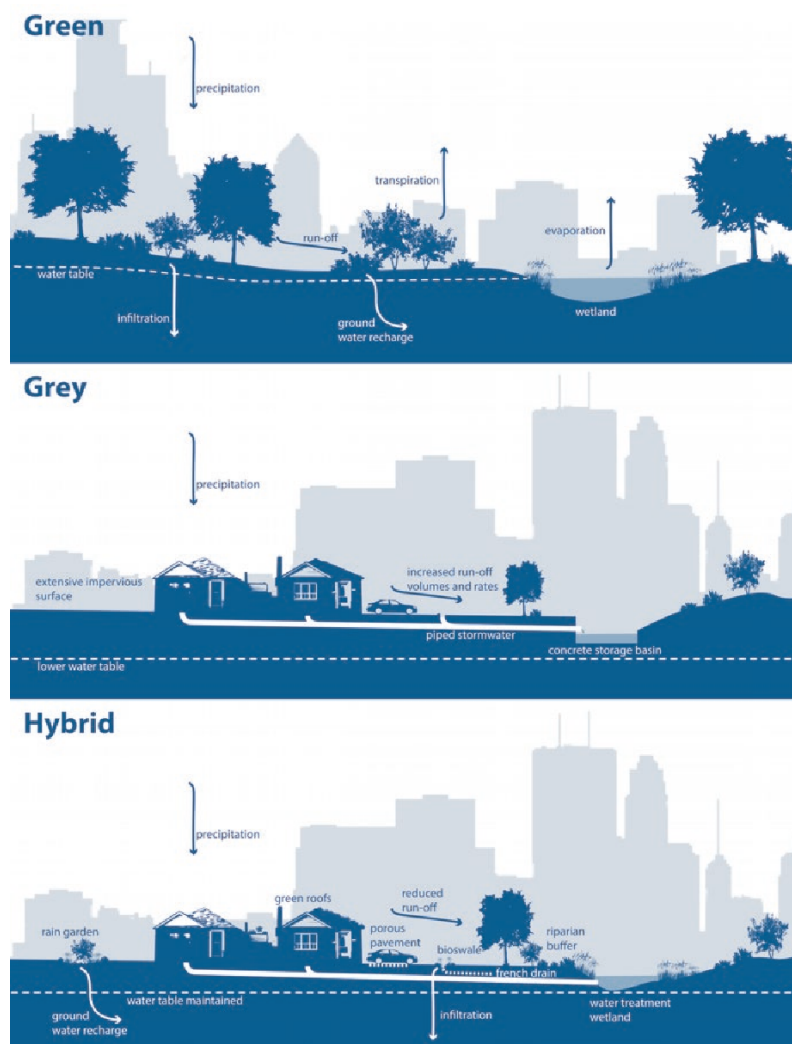


Figure 3.1: Schéma représentant les différents états d'infrastructures bleu-vertes [Al, 2019].

3.5 Quantification et qualification des indicateurs

3.5.1 Démarche générale

Dans un premier temps, chacun de ces indicateurs a dû être qualifié. C'est-à-dire que le niveau d'adaptation de chaque indicateur a dû être défini. Ensuite une méthode de quantification composée de formules mathématiques a été déterminée pour chaque indicateur. Celle-ci suppose la mise en place de variables dont leur comparaison permettra de déterminer le niveau d'adaptation de chaque indicateur. Toutes ces étapes ont permis de mettre en place une échelle pour chaque indicateur.

Les paragraphes 3.5.2 à 3.5.9 décrivent la démarche de quantification pour chaque indicateur. De plus, l'annexe 9.1 représente la matrice résumant les limites de chacun des niveaux d'adaptation de chaque indicateur.

De part l'élaboration de la matrice sur excel, les résultats de la modélisation peuvent être facilement obtenus en rentrant les paramètres d'entrée. De plus, un guide d'utilisation visible en annexe 9.2 permet de clarifier la méthodologie, les unités, les paramètres, etc.

3.5.2 Infiltration

Dans un premier temps l'infiltration permet de gérer localement les eaux de pluies, à l'endroit où elles tombent. L'infiltration se modélise facilement en connaissant les coefficients d'infiltration des différents types de revêtements. [Yang et al., 2021], [Etat de Fribourg, 2019], [Ville de Morges, 2020] sont autant d'articles mentionnant les coefficients d'infiltration des surfaces. Le tableau 9.1 en annexe 9.3 résume les coefficients de ruissellements des différentes types de surfaces utilisés dans cette méthodologie. Les coefficients d'infiltration C_i s'obtiennent depuis les coefficients de ruissellement C_r selon l'équation 3.1. Les figures 3.2, 3.3 et 3.4 ci-dessous regroupent des images de référence pour différencier les pavés à joints serrés, les pavés à joints écartés, et les pavés-gazon.

$$C_i = 1 - C_r \quad [-] \quad (3.1)$$

Afin d'avoir le coefficient d'infiltration actuel de la parcelle, il faut multiplier le coefficient d'infiltration de chaque type de revêtement $C_{i,r}$ par l'aire totale de chaque type de revêtement dans la zone étudiée A_r . Cette valeur correspond aux surfaces réduites ou surfaces actives. Finalement en divisant la somme de ces surfaces réduites par l'aire totale de la zone étudiée A_{tot} on obtient le coefficient d'infiltration moyen actuel $C_{i,actuel}$, comme représenté dans l'équation (3.2).

$$C_{i,actuel} = \frac{\sum_{r=1}^N C_{i,r} A_r}{A_{tot}} \quad [-] \quad (3.2)$$

Pour le niveau d'adaptation élevé (état vert), il est nécessaire de définir ce qui est optimal en termes d'infiltration pour chaque surface. Donc pour chaque type d'affectation de surface (trottoir, parking, route, etc.) le revêtement conciliant la meilleure infiltration et le maintien de la fonction première de la parcelle a été défini. Ces coefficients sont présentés dans le tableau 9.2 en annexe 9.3. Le coefficient d'infiltration théorique $C_{i,théorique}$ est alors obtenu de la même façon que décrite précédemment, en remplaçant le coefficient d'infiltration actuel de chaque surface par le coefficient d'infiltration optimal. Afin de qualifier la zone étudiée en termes d'infiltration, l'infiltration actuelle sera comparée à l'infiltration théorique selon l'échelle dans le tableau 3.1.

Table 3.1: Classification de l'indicateur E1 - Infiltration

TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ÉLEVÉ
$C_{i,actuel} \leq 0.25 * C_{i,théorique}$	$0.25 * C_{i,théorique} < C_{i,actuel} \leq 0.5 * C_{i,théorique}$	$0.5 * C_{i,théorique} < C_{i,actuel} \leq 0.75 * C_{i,théorique}$	$0.75 * C_{i,théorique} < C_{i,actuel}$

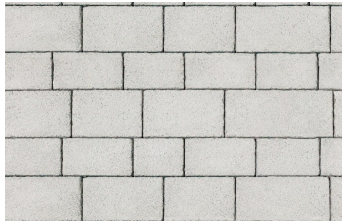


Figure 3.2: Pavés à joints serrés [Steine von Steinbach, 2018]



Figure 3.3: Pavés à joints écartés [SEPA, 2021]

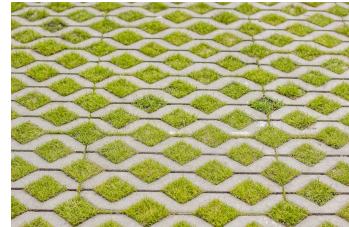


Figure 3.4: Pavés gazon [Petty Son & Prestwich, 2021]

Dans cette méthodologie seule l'infiltration en surface est prise en compte. Toutefois, la perméabilité du sous-sol est aussi une contrainte par rapport à la capacité du sol à absorber

l'eau. La perméabilité n'a pas été prise en compte lors de l'étape de quantification des indicateurs car ceux-ci évaluent le besoin et non la faisabilité. Elle nécessite d'être prise en compte lors de l'établissement de scénarios de solutions. En effet l'étude de sondages pédologiques et de la perméabilité du sous-sol pourra déterminer si oui ou non des ouvrages d'infiltration peuvent être envisagés à des endroits précis.

3.5.3 Rétention

Afin de maîtriser les ruissellements subsistants, la mise en place d'ouvrages de rétention permettent de retenir les eaux de pluies ne pouvant être ni infiltrées, ni maîtrisées par le réseau de canalisations. Bien que le volume des canalisations n'ait pas pour but d'être augmenté ces prochaines années, ce qui est actuellement en place aujourd'hui sera toujours opérationnel dans les prochaines années. Donc il doit être pris en compte dans le bilan hydraulique.

Détermination de la capacité des canalisations

Au vu du réseau des eaux pluviales très dense dans les villes, il semble difficile de déterminer la capacité précise des canalisations dans un bassin versant. Pour cette raison seule une hypothèse du volume peut être faite. Cette hypothèse peut être faite en prenant seulement les canalisations principales du bassin versant. Les volumes obtenus sont toutefois minimales par rapport au volume de rétention théorique nécessaire déterminé à partir du volume de ruissellement. C'est pourquoi une hypothèse de la sorte est acceptable et suffisante pour prendre en compte la capacité des canalisations. La méthodologie pour déterminer la capacité des canalisations est donc la suivante :

- Sélectionnez les quelques canalisations principales du réseau de gestion des eaux pluviales du bassin versant.
- Pour chaque canalisation déterminez son diamètre D et sa longueur L et donc son volume $V_{canalisations} = \pi(\frac{D}{2})^2 L$.
- La capacité totale des canalisations du bassin versant correspond à la somme des volumes calculés à l'étape précédente $V_{canalisations,tot}$.

Détermination de la rétention théorique nécessaire

Pour cette problématique de régulation de débit de fuite il a été choisi d'utiliser les données de pluie d'événements extrêmes car ce sont elles qui vont s'intensifier avec le changement climatique. Aujourd'hui les modèles mathématiques ne permettent pas de modéliser un événement extrême (donc avec un temps de retour élevé) en 2050. Pour cette raison les courbes IDF (intensité-durée-fréquence) de la station de Pully (figure 9.2 en annexe 9.4) déterminées ces dernières années seront utilisées. Afin d'avoir un événement extrême, les ouvrages de rétention seront dimensionnés avec un temps de retour de 30 ans. L'ajout d'une revanche pour la mise en place d'une surverse de sécurité a été dimensionnée pour une crue avec un temps de retour de 100 ans. Aujourd'hui les ouvrages de rétention sont contrôlés par les communes et villes, et leur dimensionnement optimal est indiqué dans les Plans Généraux d'évacuation des Eaux (PGEE) des villes. Il est notamment indiqué le volume de rétention minimal nécessaire en fonction du mètre carré de surfaces perméables ainsi que la limite du débit de fuite [Ville de Lausanne, 2016a].

Le dimensionnement du volume de rétention nécessaire est réalisé à l'aide de la "méthode des pluies" [SYMASOL, 2016] :

- Avec les courbes IDF, les hauteurs de précipitations H_p sont obtenues pour un temps de retour de 30 ans. Il est possible de les représenter en fonction de la durée de précipitations ($[min]$) comme sur la figure 3.5.
- Le débit spécifique q_s ($[mm/min]$) s'obtient en connaissant le débit de fuite Q_f ($[L/s/m^2]$ de surfaces perméables) imposé par le PGEE : $q_s[mm/min] = Q_f[L/s/m^2] * 60[s/min]$.

- La hauteur d'eau de sortie en fonction de la durée des précipitations s'obtient donc en multipliant le débit spécifique q_s ($[mm/min]$) par le temps, en suivant le pas de temps utilisé pour la courbe de hauteur des précipitations. Elle est représentée par la courbe H_e sur la figure 3.5.
- Afin d'éviter toute inondation, le bassin de rétention doit être dimensionné lorsque que la différence entre H_p et H_e est maximale (ΔH_{max}). En effet lorsque H_p est supérieur à H_e c'est que le volume d'eau entrant est supérieur au volume d'eau sortant donc qu'il y a ruissellement.
- Finalement, le volume de rétention est obtenu en multipliant ΔH_{max} par l'aire de la surface active de la zone étudiée, ainsi qu'un coefficient qui augmente le volume de 20% car la fonction hydraulique des ouvrages n'est pas parfaite. De plus, il est nécessaire de soustraire la capacité des canalisations. Le volume de rétention net théorique est donc :

$$V_{théorique} = \Delta H_{max} * A_{tot} * 1.2 - V_{canalisations,tot} \quad [m^3] \quad (3.3)$$

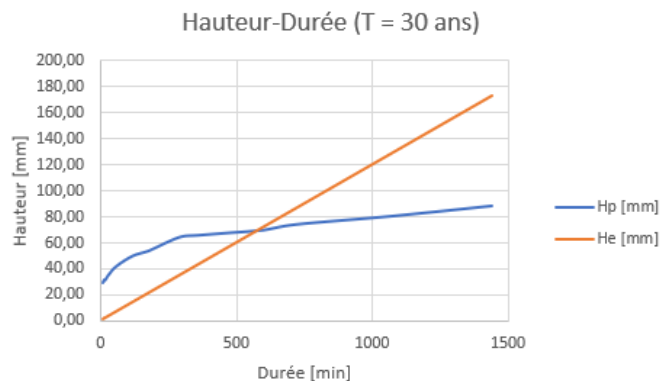


Figure 3.5: Courbes des hauteurs de précipitations H_p et hauteur d'eau de sortie du bassin de rétention H_e pour un temps de retour de 100 ans, sur la commune de Pully.

Détermination de la rétention actuelle

Afin de déterminer à quel niveau d'adaptabilité la ville se situe, il faut connaître le nombre et les caractéristiques des bassins de rétention actuellement en service. Pour la rétention artificielle différents types d'ouvrages sont possibles : les fosses de rétention, les bassins de rétention à ciel ouvert, les bassins de rétention fermés et enterrés, etc. Pour chaque ouvrage il est nécessaire de connaître son volume. Il y a aussi des ouvrages de rétention environnementale comme les noues, les plans d'eau, les jardins pluviaux, etc. Pour chacun d'eux il est aussi nécessaire d'avoir leurs caractéristiques de construction donc leur volume de rétention possible. Certains sont des ouvrages poreux, leur porosité doit donc être connue. La porosité varie en fonction du type de matériaux. Par exemple, d'après [GuidEnR Haute Qualité Environnementale, 2020], les matériaux alvéolaires en plastique, les pneus de récupération ou encore les gravas et galets ont une porosité de 0.9, 0.7 et 0.3 respectivement. Une fois que ce volume de rétention actuelle dans la zone étudiée est connu, il est possible de le comparer au volume de rétention théorique (tableau 3.2) nécessaire afin d'obtenir une valeur d'adaptabilité en termes de rétention.

Table 3.2: Classification de l'indicateur **E2 - Rétention**

TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ÉLEVÉ
$V_{actuel} \leq 0.25 * V_{théorique}$	$0.25 * V_{théorique} < V_{actuel} \leq 0.5 * V_{théorique}$	$0.5 * V_{théorique} < V_{actuel} \leq 0.75 * V_{théorique}$	$0.75 * V_{théorique} < V_{actuel}$

3.5.4 Stockage

Bien que la Suisse soit considérée comme le château d'eau de l'Europe, l'eau va localement et temporairement manquer en Suisse. En effet, dans certaines régions l'habitat, l'agriculture et les industries doivent se partager l'eau, ce qui peut devenir un réel problème si aucune planification n'est réalisée [Bettina Schäfli, 2021]. Ainsi, il devient de plus en plus nécessaire de penser à stocker l'eau de pluie là où elle tombe, puis à la réutiliser, comme par exemple pour l'arrosage des espaces verts.

Le besoin en irrigation - I

Afin de connaître la quantité de stockage d'eau nécessaire dans une zone, il est nécessaire de quantifier le besoin en irrigation des plantes. Ce besoin en irrigation correspond à la différence entre l'évapotranspiration des plantes et les précipitations, donc à la différence entre les apports et les pertes en eau. Il peut être exprimé à l'aide de l'équation (3.4) [Dukes et al., 2009], où I est le besoin en irrigation, ETR l'évapotranspiration réelle et P les précipitations.

$$I = ETR - P \quad [m^3] \quad (3.4)$$

Afin de connaître de façon générale le manque d'eau en été, les valeurs de précipitations et de températures utilisées seront des moyennes mensuelles estivales selon les prévisions en 2050. D'après [MétéoSuisse, 2013] la température moyenne estivale actuelle à Lausanne, et sur le plateau Suisse plus généralement, est de $20^\circ C$. Selon cette même source, une augmentation de $2.75^\circ C$ est à prévoir dans 30 à 40 ans en été. Ainsi une valeur de température de $22.75^\circ C$ a été utilisée pour ce projet. De la même façon [MétéoSuisse, 2013] a enregistré une valeur moyenne de précipitations en été à Lausanne de 85mm/mois et prévoit une baisse des précipitations de 20% à cette même période dans 30 à 40 ans. Ainsi, une valeur moyenne de précipitations de 68mm/mois en 2050 a été utilisée dans ce projet.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) dépend de nombreux paramètres comme la radiation solaire ou la température. Elle s'exprime selon la formule de Turc dans l'équation (3.5) [Jacques Beauchamp, 2006]. La radiation solaire globale s'exprime selon l'équation (3.6), et dépend de la radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère Iga . Cette dernière dépendant de la latitude et du mois de l'année, une moyenne sur les trois mois juin, juillet, août et pour une latitude de 45° à été réalisée [Jacques Beauchamp, 2006]. Ainsi, une valeur de 920 [cal/cm²/jour] pour l' Iga a été utilisée. De plus, h/H représente la durée maximale d'insolation selon la période de l'année et varie entre 0 et 1. Par manque de données, il a été estimé qu'en été et en Suisse cette valeur est de 0.75 selon [Louis Roussel, 1972].

$$ETP = 0.4 * \frac{T}{T + 15} * (Rg + 50) \quad [mm/mois] \quad (3.5)$$

$$Rg = Iga * (0.18 + 0.62 * h/H) \quad [cal/cm^2/jour] \quad (3.6)$$

Cependant, l'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évapotranspiration pour une surface de référence. Afin d'avoir l'évapotranspiration réelle (ETR) il est nécessaire de connaître les coefficients de culture K_c pour chaque type de végétation (3.7) [Savva et al., 2002]. Des coefficients de culture ont été proposés dans la Matrice Bleue-Verte, mais [Allen et al., 1998] en propose d'autres qui peuvent être utiles.

$$ETR = ETP * K_c \quad [mm/mois] \quad (3.7)$$

Ainsi les besoins en irrigation de chaque type de plante I_c sont obtenus en [mm/mois]. Afin d'avoir ces besoins en termes de volume pour chaque type de plante $I_{c,volume}$ ([m³/mois]), il suffit de multiplier le résultat précédent par la surface occupée par chaque type de plante.

Volume de stockage nécessaire pour arroser les toitures végétalisées - S_{toits}

Dans un premier temps le volume de stockage nécessaire pour arroser les plantes sur les toitures végétalisées sera déterminé.

Une fois que le besoin mensuel en irrigation a été exprimé en [m³/mois] pour chaque type de plante, il est possible d'obtenir le besoin en irrigation de la toiture entière I_{toits} en additionnant ces volumes selon l'équation (3.8). c représente tous les types de culture, N le nombre de culture différentes, $I_{c,volume}$ le besoin mensuel de chaque type de plante exprimé en volume.

$$I_{toits} = \left(\sum_{c=1}^N I_{c,volume} \right) \quad [m^3/mois] \quad (3.8)$$

Finalement, en multipliant ce volume par 3 (équation 3.9) il est possible d'obtenir le besoin sur la période estivale entière, et donc le volume de stockage nécessaire pour arroser les toitures végétalisées S_{toits} .

$$S_{toits} = I_{toits} * 3 \quad [m^3/été] \quad (3.9)$$

Dans le cas où l'évapotranspiration de la végétation serait inférieur aux précipitations et donc que le besoin en irrigation serait négatif, il est possible de récolter ce surplus d'eau pour irriguer les plantes au sol. Dans ce cas, le volume de stockage nécessaire pour les toitures végétalisées est de 0 m³.

Volume de stockage nécessaire pour arroser les plantes au sol - S_{toits}

Dans un second temps, le volume de stockage nécessaire pour arroser les plantes au sol va être étudié.

Une fois que le besoin des plantes au sol est connu en termes de volume pour chacune des plantes, le besoin total des plantes au sol en irrigation I_{sol} est obtenu de la même façon que l'équation (3.8).

Ensuite, il va falloir déterminer la **capacité de récolte des toits** R_{toits} . Comme l'eau de pluie est récoltée via les toits non recouverts de plomb ou d'amiante et préférentiellement plat [OFEPF, 2000], il faut déterminer la surface des toitures pouvant récolter de l'eau A_{toits} . Ainsi il est possible de quantifier le volume d'eau pouvant être récolté des toits en été et en hiver dépendant des précipitations P , selon l'équation (3.10).

$$R_{toit} = P * Aire_{toits} \quad [m^3/mois] \quad (3.10)$$

Dans ce cas, le volume de stockage dépend du besoin en eau I mais aussi de la capacité de récolte des toits R . Ainsi trois différents cas apparaissent, et sont schématisés dans la figure 3.6 ci-dessous.

- Dans le cas où la récolte R mensuelle estivale d'eau de pluie est supérieure au besoin I mensuel estival d'eau de pluie, le volume de stockage S correspond au besoin mensuel d'eau de pluie (schéma inférieur).

- Dans le cas où il y a un déficit, donc que l'apport mensuel est inférieur au besoin mensuel, il sera nécessaire de récolter de l'eau en période "hivernale" donc en prenant en compte la moyenne des précipitations hivernales. Si la somme des déficits sur les trois mois d'été (déficit total) est inférieure à l'apport mensuel estival, le volume de stockage nécessaire correspondra à l'apport d'eau possible en été par les toits (schéma du milieu).
- Au contraire si ce déficit total est largement supérieur à l'apport d'eau mensuel en été par les toits alors le volume de stockage nécessaire correspondra au déficit total (schéma supérieur). Dans le cas où il faudrait plus de neuf mois de stockage en période "hivernale" pour stocker l'eau besoin pour l'été, un volume maximal correspondant un neuf mois de stockage a été défini; sinon il faudrait commencer un stocker pendant l'été précédent ce qui n'est pas envisageable.

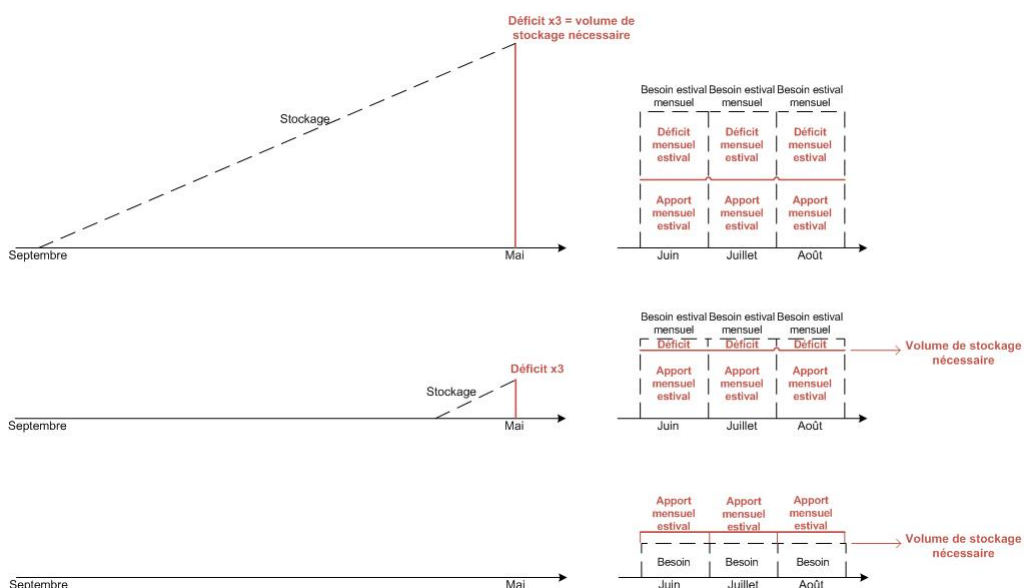


Figure 3.6: Détermination du volume de stockage nécessaire selon les différents cas de figure.

Finalement, le volume de stockage théorique total $V_{théorique}$ correspond à la somme du volume de stockage pour les toitures végétalisées et celui pour la végétation au sol. L'échelle de la matrice est réalisée sur la base de la comparaison entre le volume de stockage théorique nécessaire et le volume de stockage actuel V_{actuel} , selon le tableau 3.3 ci-dessous.

Table 3.3: Classification de l'indicateur **E3 - Stockage**

TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ÉLEVÉ
$V_{actuel} \leq 0.25 * V_{théorique}$	$0.25 * V_{théorique} < V_{actuel} \leq 0.5 * V_{théorique}$	$0.5 * V_{théorique} < V_{actuel} \leq 0.75 * V_{théorique}$	$0.75 * V_{théorique} < V_{actuel}$

3.5.5 Continuité écologique

Afin de quantifier et qualifier la biodiversité dans un milieu urbain, il est intéressant de se focaliser sur la quantité et la qualité des habitats présents. Ceux-ci dépendent des espèces qui ont des besoins différents. Certaines espèces, appelées bioindicateurs, sont des espèces animales ou végétales très exigeantes, dépendant de conditions biotiques et abiotiques très précises. Leur présence renseigne donc sur la qualité de l'environnement. Dans le cas où un bioindicateur disparaîtrait d'un milieu c'est un signe de déséquilibre de l'écosystème naturel.

Bien que l'utilisation d'une espèce cible peut paraître peu robuste dû au fait que le schéma serait potentiellement différent pour une autre espèce, l'utilisation d'un bioindicateur de référence dans cette méthodologie permettra de pouvoir analyser à quel point la zone étudiée est accueillante pour la biodiversité. Les Papillons diurnes et Zygènes sont particulièrement sensibles à toute modification de la qualité de leur environnement, ils sont donc de parfait bioindicateurs. De plus ils sont très connus en Suisse, présents en milieu urbain mais en danger. Pour ces raisons la méthodologie développée pour l'indicateur de *Continuité écologique* se base sur l'espèce de Papillon diurne [Wermeille, 2014].

La méthodologie générale de la quantification de la continuité écologique sera basée sur la méthodologie utilisée dans le projet de master [Rochat, 2014] puis la thèse d'Estelle Rochat [Rochat, 2020], adaptée aux besoins de ce projet. En effet [Rochat, 2014] détermine la continuité écologique d'un espace pour les papillons mais pour une taille de ville beaucoup plus grande. Plusieurs étapes sont nécessaires à la mise en place de cet indicateur. Elles sont décrites dans les prochains paragraphes et représentées dans la figure 3.7.

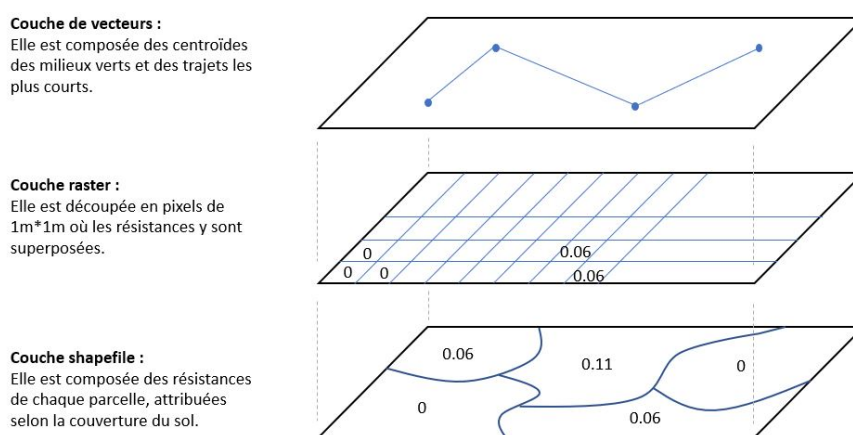


Figure 3.7: Les différentes étapes de qualification de la continuité écologique

Rastérisation et taille des pixels

Tout d'abord la zone d'étude doit être rasterisée en pixels. Les pixels seront l'unité de mesure de la probabilité de connectivité. Afin de déterminer la résolution de la zone d'étude, il est nécessaire d'observer l'ordre de grandeur des obstacles que peuvent rencontrer les papillons. Les routes par exemple sont de l'ordre de 5 à 7 mètres de largeur ou les chemins environ 2 mètres de large. Donc les obstacles sont d'un ordre de grandeur de l'ordre du mètre. Pour cette raison, une taille de pixels de 1m*1m a été adoptée pour ce projet afin d'obtenir un niveau de détail suffisant pour avoir les obstacles mais pas trop important pour éviter les détails inutiles.

Classification de la couverture du sol

Ensuite, chaque type de surface doit être classé selon leur couverture du sol. En se basant sur les 10 classes listées par [Rochat, 2014] et sur le fait que ce projet se déroule en milieu urbain, les classes d'affectation de sol ont été listées ci-dessous :

- Les parcs, jardins, zones boisées, toitures végétales, etc. ont été regroupés dans une seule classe et forment les "milieux verts" pouvant accueillir la faune et la flore.
- Les pavés engazonnés, graviers, sable, etc. regroupent les surfaces perméables. Celles-ci forment une niche pour la biodiversité, en offrant un habitat varié.

- Les mares, étangs, cours d'eau, etc. offrent un milieu humide, diversifié, composé de végétation permettant la croissance des papillons.
- Les routes, pavés, ou toutes surfaces imperméables ne permettant pas le développement de biodiversité et constituent une barrière aux papillons.
- Les rivières et lacs forment une barrière infranchissable car ils ne sont pas favorables au développement des papillons de par leur taille.
- Les bâtiments sont des éléments particuliers qui peuvent aussi bien être un obstacle principal ou au contraire être une source de biodiversité et faciliter la continuité écologique. Leurs surfaces horizontales (toitures) peuvent être facilement prises en compte dans la continuité écologique, toutefois leurs surfaces verticales (façades) doivent être prises en compte de manière différentes. Leur résistance varie en fonction de leur hauteur et leur revêtement. Cette subtilité est expliquée en détails dans la partie "Le cas particulier des façades" ci-dessous.

Aussi, une résistance doit être attribuée à chaque classe afin que les éléments les plus difficiles à franchir par les papillons diurnes aient une résistance plus élevée. Une hypothèse initiale doit être émise quant au déplacement maximal d'un papillon. D'après [Biogarten, 2021] les yeux à facettes des papillons leur permettent de reconnaître la couleur des fleurs jusqu'à 5 mètres environ, donc en milieu défavorable. C'est une faible distance, et pourtant la couleur des fleurs et l'aspect visuel est un critère très important pour les papillons du jour. Ainsi l'hypothèse de départ a été faite comme quoi la distance maximale entre deux milieux verts doit être de 5 mètres en milieu le plus défavorable, c'est-à-dire sur les surfaces perméables, soit une distance de 5 pixels.

Les valeurs de résistance définies dans ce projet se basent sur les valeurs proposées par [Rochat, 2014], c'est en effet les seules valeurs trouvées dans la littérature pour cette espèce. Ces valeurs donnent donc un aperçu de variation et non une exactitude. La résistance d'un pixel pour une surface imperméable est de 10 ([Rochat, 2014]) et donc le coût maximal de trajet qui peut être effectué par un papillon est de $10 * 5pixels = 50$. Ainsi, les bâtiments ayant une hauteur supérieure à 5m auront une résistance de 50 donc jugés infranchissables. De plus, un bâtiment avec une hauteur inférieure à 2 mètres à la même résistance qu'un mètre de distance sur un sol imperméable. Finalement plus le sol est perméable voir végétal, plus la résistance est faible et donc plus le maximum de pixels pouvant être parcouru augmente. Ainsi le tableau 3.4 présente les résistances des pixels pour chaque type de surface.

Table 3.4: Résistance des pixels en fonction du type de surface auquel ils sont affectés.

Couverture du sol	Résistance du pixel
Parc, jardin, zone boisée, toit végétal	0
Pavés engazonnés, graviers, sable, ...	5
Mare, étang, cours d'eau	5
Routes, surfaces imperméables, pavés, ..	10
Bâtiment $\leq 2m$	10
Bâtiment $2 < \dots \leq 5m$	20
Bâtiment $> 5m$	50 (∞)
Bâtiment avec façade végétale $\leq 2m$	0
Bâtiment avec façade végétale $2 < \dots \leq 5m$	0
Bâtiment avec façade végétale $> 5m$	0
Rivière, lac	50 (∞)

Le cas particulier des façades

Les façades étant des surfaces verticales, elles doivent être prises en compte différemment. En effet, bien qu'elles constituent des obstacles ou au contraire des éléments de passage si elles

sont végétalisées, leurs surfaces ne sont pas prises en compte dans la formule de probabilité de connectivité PC . Celle-ci prend en compte la surface horizontale totale (équation 3.12). Ainsi, lors du calcul du coût d'un trajet, le pixel qui contiendra la façade d'un bâtiment prendra la valeur de résistance en fonction du revêtement de la façade et de sa hauteur, selon le tableau 3.4. Par contre la surface du toit prendra la valeur de résistance en fonction de son revêtement. Un toit imperméable prendra une valeur de 10 comme toute surface imperméable et un toit végétal prendra une valeur de 0 comme toute surface végétale. La figure 3.8 ci-dessous représente les différents cas de figure des bâtiments qui peuvent être rencontrés dans les projets et la valeur des pixels correspondant.

Bien qu'elles soient favorables au développement de la biodiversité et qu'elles favorisent leur déplacement, les façades végétales ne sont pas des milieux verts car leurs surfaces ne sont pas prises en compte dans l'aire totale de la zone d'étude. Ainsi les façades végétales seront prises en compte seulement lorsqu'elles sont sur le trajet le plus court entre deux milieux verts. En leur donnant une résistance de 0, elles permettent de témoigner une continuité, ou du moins le corridor qu'elles créent.

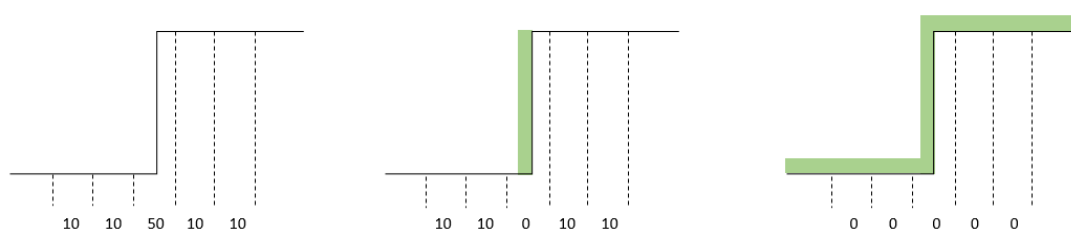


Figure 3.8: Coupe transversale de bâtiments et la valeur des pixels associés à chaque classe de couverture. De gauche à droite respectivement : Un sol imperméable, un mur en béton ($> 50m$) et un toit imperméable; Un sol imperméable, un mur végétal ($> 50m$) et un toit imperméable; Un sol végétal, un mur végétal ($> 50m$) et un toit végétal.

Élaboration du trajet le plus court

Finalement, afin de déterminer la continuité écologique, il est nécessaire de déterminer le trajet qui sera utilisé pour l'analyser. Sur la base du théorème du chemin le plus court, un trajet sera élaboré entre chaque milieu vert. A partir de chaque milieu vert, un trajet en direction du milieu vert le plus proche sera défini. Toutefois, si un trajet a déjà été tracé, il ne peut pas l'être une deuxième fois. Par exemple, si le milieu vert appelé A a comme milieu vert le plus proche B, ce trajet peut être tracé. Ensuite si le milieu vert le plus proche de B est A alors ce trajet ne peut pas être tracé une deuxième fois. Il est donc nécessaire de tracer le prochain trajet le plus court pas encore tracé (figure 3.9). En résumé : chaque milieu vert doit être relié au milieu vert le plus proche avec lequel il n'a pas encore été lié. Cette condition permet d'éviter la formation de petits îlots de biodiversité qui entraverait cette volonté de continuité. Bien sûr cette méthode n'amène pas à un schéma unique. Toutefois il permet d'obtenir une bonne estimation d'analyse de continuité.

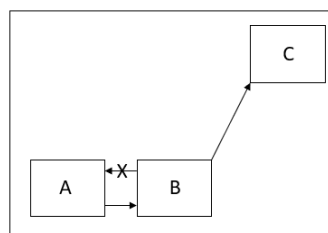


Figure 3.9: Méthodologie afin de déterminer le plus court trajet.

Probabilité de connectivité et coût des trajets

Différents indices de connectivité existent et sont utilisés dans la planification territoriale. Dans cette méthodologie, l'indice de probabilité de connectivité PC développé par [Saura et al., 2007] sera utilisé car il prend en compte la disponibilité des habitats ainsi que la dispersion des parcelles d'habitats à travers l'ensemble de la zone étudiée.

La probabilité d'indice de connectivité (PC) est définie comme la probabilité que deux papillons pris aléatoirement dans la zone d'étude puissent se rencontrer dans un milieu vert accessible à l'un et à l'autre étant donné un ensemble de n milieux verts et les connexions (p_{ij}) entre eux. Cette probabilité est représentée dans l'équation (3.11) suivante :

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j p_{ij}^*}{A^2} \quad [-] \quad (3.11)$$

où a_i et a_j représente les milieux verts de départ et d'arrivée respectivement, et p_{ij}^* la probabilité maximale de mouvement entre les deux milieux.

Toutefois, cette probabilité de connectivité nécessite de connaître le coût du trajet de tous les milieux i vers tous les milieux j , ce qui représente le coût de n^2 trajets. De manière générale le nombre de milieux est de l'ordre de 30, ce qui correspond à déterminer le coût de 900 trajets! Ceci n'est pas envisageable pour une méthodologie de ce type. Ainsi dans cette méthodologie, le choix a été fait de prendre pour chaque milieu vert seulement le trajet le plus court vers un seul autre milieu vert comme expliqué précédemment. Par conséquent la formule de probabilité de connectivité (3.11) ci-dessus a été simplifiée en l'équation (3.12). De plus, comme la probabilité de continuité actuelle $PC_{actuelle}$ sera comparée à la probabilité de continuité théorique $PC_{théorique}$ et que dans ces deux cas le nombre de milieux verts N est généralement différent, les probabilités de connectivité seront normalisées entre 0 et 1. La probabilité de connectivité maximale PC_{max} correspondant à $1/N$ (détails du calcul en annexe 9.5), les probabilités de connectivité doivent être multipliées par N (équation (3.12)).

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i p_{*i}^*}{A^2} * N \quad [-] \quad (3.12)$$

où a_i représente le milieu vert de départ et b_i le milieu vert d'arrivée le plus proche de a_i . p_{*i}^* représente la probabilité maximale de mouvement du milieu de départ vers le milieu d'arrivée. Cette probabilité de déplacement s'obtient selon l'équation (3.13) ci-dessous.

$$p_{*i}^* = e^{-\alpha c_i} \quad [-] \quad (3.13)$$

α est une constante à déterminer et c_i est le coût de déplacement du milieu de départ vers le milieu d'arrivée.

La constante α peut être déterminée sachant que pour une probabilité de mouvement moyenne ($p_{*i} = 0,5$), le coût moyen de déplacement est de 25. Ainsi une valeur de 0.28 est obtenue pour alpha selon l'équation (3.14)

$$\begin{aligned} p_{*i} &= 0.5 = e^{-25\alpha} \\ \alpha &= \frac{-\ln(0.5)}{25} \\ &= 0.28 \quad [-] \end{aligned} \quad (3.14)$$

Finalement, le coût de trajet c_i est obtenu en multipliant le nombre de pixels d'une certaine couverture de sol par la résistance de la couverture de sol. Si plusieurs couvertures de sols différentes sont traversées, les produits précédents seront additionnés.

L'échelle de la matrice

La probabilité de connectivité actuelle $PC_{actuelle}$ sera comparée à la probabilité de connectivité théorique $PC_{théorique}$ selon le tableau 3.5. Celle-ci a dû être définie tout en sachant que les sols en ville sont généralement déjà saturés. De plus, il n'est pas possible de changer l'affectation des parcelles. Ainsi, la méthodologie se focalise sur les toitures et façades des bâtiments et certaines parcelles ou le revêtement peut être optimisé sans en changer l'affectation. Les modifications à prendre en compte pour modéliser la probabilité de connectivité théorique sont donc :

- Toutes les toitures plates doivent être couvertes de végétation.
- Toutes les façades doivent être végétalisées, ainsi elles agissent comme corridor entre la végétation au sol et sur les toits.
- Les trottoirs, routes et places peuvent être en pavés ou revêtements perméables. Ici la continuité peut difficilement être améliorée sans compromettre l'habitabilité.
- Les parkings doivent être en dalles gazon.
- Les aires de jeu doivent être en herbe.

C'est seulement au moment de l'analyse de la matrice, de la réflexion des mesures à prendre et de la réflexion sur une planification durable de l'espace qu'il pourrait être envisagé de modifier l'affectation de la parcelle pour mettre de la rétention ou de la végétation par exemple.

Table 3.5: Classification de l'indicateur **B1 - Continuité écologique**

TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ÉLEVÉ
$PC_{actuelle} \leq 0.25 * PC_{théorique}$	$0.25 * PC_{théorique} \leq PC_{actuelle} < 0.5 * PC_{théorique}$	$0.5 * PC_{théorique} \leq PC_{actuelle} < 0.75 * PC_{théorique}$	$0.75 * PC_{théorique} \leq PC_{actuelle}$

QGIS un outil pour évaluer la continuité

Afin de faciliter la mise en place de l'indicateur de continuité écologique, l'utilisation d'un logiciel a paru être une option pour déterminer le chemin le plus court. D'après les recherches réalisées sur le sujet, les logiciels comme Graphab, Conefor ou R avec les packages *igraph* et *grainscape* [Papet et al., 2020] peuvent être utilisés à cet objectif. Du fait que QGIS soit beaucoup utilisé à l'EPFL, dans les bureaux d'ingénieurs (comme BG Ingénieurs Conseils) ou dans les services d'ingénierie des villes, il a paru être une option efficace où cette méthodologie pourrait être applicable. Ainsi l'élaboration de différentes étapes sont nécessaires, et suivent la figure 3.7.

Dans un premier temps, une couche par type de revêtement doit être créée, selon les catégories de couverture du sol présentes dans le tableau 3.4. Dans chacune des ces couches des polygones doivent être tracés pour représenter ces espaces avec ces revêtements. Chacune de ces couches doivent aussi avoir un attribut "Type" dans lequel chaque polygone doit avoir indiqué le type de revêtement selon les catégories de couverture du sol présentes dans le tableau 3.4, ainsi qu'un deuxième attribut nommé "Résistance" qui indique le coût d'un pixel toujours selon le tableau 3.4. Pour la couche de végétation, les centroïdes des polygones doivent être créés grâce à l'outil *Centroids*. Toutefois apparaît ici un premier biais car les centroïdes ne représentent pas les centres géométriques des polygones mais les centres de masse. Ensuite l'outil *Merge Layers* permet de créer une couche contenant toutes les couches de revêtement créées précédemment, donc tous les polygones et leur attribut "Type" qui permettent de connaître leur revêtement. Cette couche

finale doit être rasterisée en pixels de 1m*1m de résolution. Ainsi l'outil *Rasterize (vector to raster)* permet de créer cette grille de pixels. Finalement l'outil *Profiles from Lines* dans la boîte à outil SAGA permet de connaître la valeur du chemin le plus court. Toutefois le deuxième biais ici c'est que QGIS utilise le plus court chemin à vol d'oiseau donc il passe facilement au-dessus des bâtiments. Dans la méthode "à la main" il est recommandé de choisir le chemin le plus court en fonction du coût du trajet, donc choisir un chemin plus long mais moins coûteux.

Ainsi cette méthode n'est pas totalement convaincante et pourrait être améliorée. La méthode dite "à la main" est préférée pour établir cet indicateur.

3.5.6 Diversité des milieux

Afin de maintenir au long terme la biodiversité dans un paysage rural ou urbain, il est nécessaire de s'assurer de la diversité des milieux favorables à la biodiversité. Cette méthodologie a été élaborée pour l'espèce du papillon diurne et donc tous les milieux verts favorables à son maintien dans un espace urbain. Il y a différents aspects dans la diversité : la richesse spécifique et la régularité numérique ou l'uniformité des milieux verts. L'indice de diversité de Shannon H' , souvent utilisé en écologie, permet de mesurer la diversité des espèces et est obtenu selon l'équation (3.15) [Carpentier et al., 1999]. En effet, selon [Nagendra, 2002] l'indice de Shannon combine ces deux aspects de la diversité.

$$H' = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (3.15)$$

N correspond au nombre de milieux représentés, et p_i à la proportion de la surface s_i du milieu vert i par rapport à la surface S de l'ensemble de "milieux verts" au sein de la zone étudiée (équation (3.16)).

$$p_i = \frac{s_i}{S} \quad (3.16)$$

La richesse spécifique du paysage représente le nombre de milieux présents dans la zone étudiée. La régularité numérique représente le pourcentage relatif de chaque milieu vert par rapport à tous les milieux verts donc l'abondance de chaque milieu [Nagendra, 2002]. Donc pour avoir un paysage diversifié il faut avoir non seulement un grand nombre de milieux verts, mais aussi une proportion équirépartie entre tous ces milieux. Dans ce sens, plus H' est proche de 0, moins les milieux sont diversifiés et donc plus un unique lieu est représenté. Inversement, plus l'indice H' s'approche de $\log_2(N)$, plus la zone est diversifiée et plus les milieux sont équitablement représentés. $\log_2(N)$ représente donc le maximum de diversité. Toutes les zones étudiées n'étant pas composées du même nombre de milieux N , il est nécessaire d'analyser dans un premier temps le nombre de milieux représentés, puis dans un second temps comparer H' au maximum de diversité $\log_2(N)$. Dans la matrice ci-dessous (tableau 3.6 l'échelle du nombre de milieux verts s'étend de 0 à 8. En effet, une liste exhaustive des milieux verts en zone urbaine favorables aux papillons a été déterminée sur la base de la littérature [Vallee, 2017] [Wermeille, 2014]. 8 milieux ont été identifiés comme favorables et seront utilisés dans cette méthodologie, pour cet indicateur :

- Pré fleuri (espace avec peu de fauchage)
- Végétation rudérale
- Pelouse (espace avec beaucoup de fauchage)
- Zones boisées
- Vergers, vignes, jardins potagers
- Fossés, noues et zones humides

- Toitures végétales
- Façades végétales

Dans la matrice bleue-verte, l'indicateur de diversité des milieux correspond donc à un tableau à double entrée 3.6 où l'indicateur se dirige vers un niveau d'adaptation élevé quand le nombre de milieux représentés augmente et que H devient supérieur à 50%.

Table 3.6: Classification de l'indicateur **B2 - Diversité des milieux**

		Diversité de Shannon H'	
		H' < 50%ln(N)	H' > 50%ln(N)
Nombre de milieux représentés	Entre 0 et 2	TRÈS FAIBLE	FAIBLE
	Entre 3 et 5	FAIBLE	MOYEN
	Entre 6 et 8	MOYEN	ELEVÉ

3.5.7 Albedo

Les îlots de chaleur qui se créent en milieu urbain sont en partie dû aux revêtements des surfaces des espaces publics, mais aussi aux revêtements des façades et des toitures des bâtiments. En optimisant le choix des matériaux et des revêtements en zone urbaine, il est facile de réguler l'albedo. Le tableau 9.3 en annexe 9.6 recense les valeurs d'albedo de différents types de surface selon [ICARE et al., 2012] et [Les Services de Bordeaux Métropole, 2017]. [ICARE et al., 2012] recense l'albedo d'autres types de surfaces moins communes et non présentes dans le tableau 9.3. Afin de permettre un confort urbain optimal, il faudrait favoriser un albedo entre 0.3 et 0.8 [Ville de Lille, 2021]. En effet un albedo inférieur à 0.3 créerait un îlot de chaleur important où le rayonnement solaire serait majoritairement absorbé par les bâtiments et revêtements urbains. À l'inverse un albedo trop fort pourrait provoquer un fort éblouissement et donc un inconfort pour les usagers. L'échelle de cet indicateur se base donc sur un albedo optimal entre 0.3 et 0.8, représenté par un niveau d'adaptation élevé, vert. Puis en s'éloignant de cette optimum et en se rapprochant vers des valeurs extrêmes d'albedo, l'indicateur évoluera vers les niveaux d'adaptation moyen, faible et très faible comme représenté dans la figure 3.10. Ainsi, l'échelle de l'indicateur est indiqué dans le tableau 3.7.

Table 3.7: Classification de l'indicateur **C1 - Albedo**

TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ÉLEVÉ
$0 \leq \alpha < 0.1$ et $0.9 \leq \alpha \leq 1$	$0.1 \leq \alpha < 0.2$ et $0.8 \leq \alpha < 0.9$	$0.2 \leq \alpha < 0.3$	$0.3 \leq \alpha < 0.8$

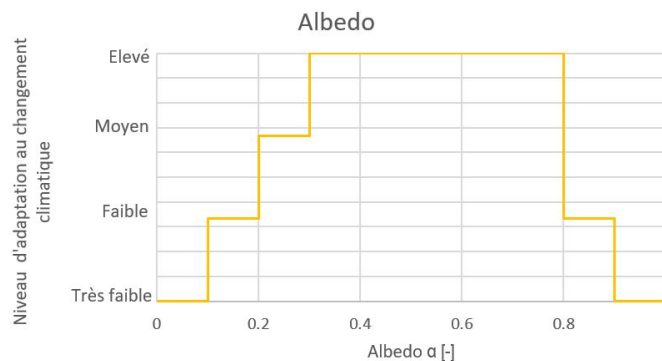


Figure 3.10: Variation des niveaux d'adaptation des villes au changement climatique en fonction de l'albedo.

3.5.8 Ombre

L'ombre portée par la canopée urbaine, les bâtiments, les infrastructures (toits prolongés, pergolas, toiles tendues) varie tout au long de la journée en fonction de la déclinaison du soleil. Cependant le moment où l'ombre portée est minimale, donc que la température et l'effet d'îlot de chaleur sont à leur maximum se situe au moment où le soleil est au zénith. Pour cette raison cette méthodologie mesure l'ombre quand le soleil est au zénith, pour avoir le cas le plus extrême. Il est donc nécessaire de calculer l'aire réelle (et non l'aire d'une ombre projetée) de la canopée urbaine et des infrastructures apportant de l'ombre pour avoir la surface ombragée quand le soleil est au zénith. Ainsi l'indicateur d'ombre sera défini à l'aide du ratio (3.17) entre l'aire de la surface ombragée au sol (A_{ombre}) et l'aire totale de la zone étudiée (A_{tot}).

$$R_{ombre} = \frac{A_{ombre}}{A_{tot}} * 100 \quad (3.17)$$

L'échelle de la matrice a été réalisée à partir des deux observations suivantes : une surface totalement ensoleillée, sans ombre, n'est pas adaptée face à l'augmentation des températures prévues en été en 2050 et à l'inverse une surface totalement ombragée n'est pas agréable pour la population qui souhaite passer un moment dans cet espace. Pour cette raison, la surface optimale d'ombre dans une zone correspond à une quantité d'ombre autour de 50% par rapport à la surface totale de la zone étudiée. Puis, plus le curseur s'éloigne de cette médiane, plus l'indicateur se rapproche vers un niveau d'adaptation très faible comme représenté sur la figure 3.11. Le tableau 3.8 indique donc l'échelle de cet indicateur.

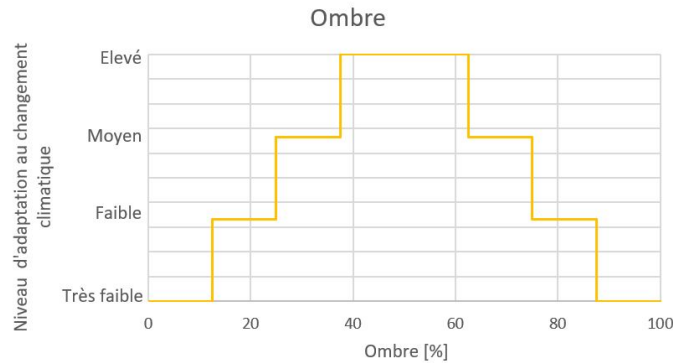


Figure 3.11: Variation des niveaux d'adaptation des villes au changement climatique en fonction de l'ombre.

Toutefois il y a deux possibilités pour analyser la surface d'ombre dans la zone étudiée : ne prendre que les surfaces ombragées accessibles à la population, c'est-à-dire les trottoirs ombragés, places ombragées, etc. ou prendre la surface totale de la canopée urbaine donc la surface ombragée totale. La première option se concentre sur l'habitabilité de la zone alors que la deuxième option permet d'étudier le micro-climat et donc l'effet d'îlot de chaleur. Pour cette raison et pour répondre à la problématique originale d'îlot de chaleur cette méthodologie utilise la totalité de la surface de la canopée urbaine pour quantifier l'ombre de la zone étudiée (deuxième option). Dans l'indicateur de mobilier urbain l'ombrage sera cette fois-ci lié à l'habitabilité à travers les aménagements urbains.

Table 3.8: Classification de l'indicateur **C2 - Ombre**

TRÈS FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ÉLEVÉ
$0 \leq R_{ombre} < 12.5\%$ et $87.5 \leq R_{ombre} \leq 100\%$	$12.5 \leq R_{ombre} < 25\%$ et $75 \leq R_{ombre} < 87.5\%$	$25 \leq R_{ombre} < 37.5\%$ et $62.5 \leq R_{ombre} < 75\%$	$37.5 \leq R_{ombre} < 62.5\%$

3.5.9 Mobilier urbain

Le confort des usagers ne dépend pas seulement du micro-climat du quartier. En effet, les aménagements urbains doivent être eux aussi adaptés au climat et aux besoins des usagers. Le mobilier urbain doit être adéquat, suffisant, et adapté. Ainsi cet indicateur analysera la quantité (suffisante, insuffisante ou absente) de chaque type de mobilier ainsi que sa qualité. Comme ce projet est focalisé sur la saison estivale et les fortes températures, la qualité analysée sera l'ombrage suffisant du mobilier.

Afin d'avoir l'avis de la population touchée par ces infrastructures, un sondage doit être réalisé auprès des usagers du quartier. Pour chaque quartier, le sondage doit énoncer clairement les délimitations du quartier, et poser six questions. Dans l'annexe 9.7, un exemple de sondage peut être trouvé. Parmi ces six questions, deux analysent la nécessité ou non d'installer certains types de mobilier ; en effet il est intéressant aussi de connaître l'avis de la population quant à leurs besoins. Cette information permettra de savoir quels mobiliers doivent être envisagés d'être installés ou non. Aussi, avoir une idée du temps que pourraient passer les habitants du quartier à l'extérieur donne un aperçu de leur ressenti du quartier et oriente le choix de mesures vers différentes solutions. Finalement, une question ouverte à la fin sur les remarques et suggestions à propos du mobilier du quartier est intéressante afin d'avoir un avis plus précis du public et des idées encore plus adaptées au quartier en question.

L'annexe 9.7 a été réalisée pour le cas particulier de l'EPFL (ici seulement la partie sur le quartier EST est présente mais les questions sont identiques pour les autres quartiers). En modifiant l'introduction et la carte présentant le quartier, il est possible voir recommandé d'utiliser ce sondage. La Matrice Bleue-Verte permet d'obtenir rapidement la classe dans laquelle se trouve le quartier en termes de quantité et qualité de mobilier. L'analyse des résultats se fait de la façon suivante :

- Pour la quantité, le pourcentage global de chaque catégorie (absent, insuffisant, suffisant) sera calculé à partir des pourcentages de chaque type de mobilier représenté. Par exemple, si il y a 7 types de mobilier sélectionnés pour le sondage, le pourcentage global de chaque catégorie se calcul en faisant la somme des pourcentages de chaque mobilier, multiplié par 1/7 (comme représenté sur la figure 3.12).

	QUANTITE SUFFISANTE	QUANTITE INSUFFISANTE	ABSENT
Banc	X1 %	Y1 %	Z1 %
Table	X2 %	Y2 %	Z2 %
Jeux	X3 %	Y3 %	Z3 %
...
...
Potager	X7 %	Y7 %	Z7 %
TOTAL en %	= Somme(x1;x7) * 100/700	= Somme(y1;y7) * 100/700	= Somme(z1;z7) * 100/700

Figure 3.12: Détermination du pourcentage global pour la quantité de mobilier.

- Pour la qualité, les types de mobilier absents ne seront pas pris en compte dans le jugement, et seules deux catégories seront calculées : "insuffisamment ombragés" et "suffisamment ombragés". Le pourcentage global de chacune de ces catégories sera calculé de la même façon que pour la quantité de mobilier, à la différence que la somme des pourcentages de chaque mobilier doit être multiplié par 1/N, où N est le nombre de mobilier présent (non absent). Par exemple, dans la figure 3.13, deux types de mobilier sont absents sur les sept, donc la somme des pourcentages de chaque catégorie sera multipliée par 1/5.
- Ensuite, la catégorie ayant le plus grand pourcentage global est considérée comme la catégorie la plus représentative et sera utilisée pour classer quantitativement et qualitativement la zone d'étude avec la Matrice Bleue-Verte (tableau 3.9). Dans le cas où deux catégories ont le même pourcentage, la "pire catégorie" sera considérée comme la catégorie la plus représentative.

	INSUFFISAMMENT OMBRAGE	SUFFISAMMENT OMBRAGE	ABSENT
Banc	X1 %	Y1 %	
Table	X2 %	Y2 %	Oui
Jeux	X3 %	Y3 %	
...			
...			
Potager	X7 %	Y7 %	Oui
TOTAL	= Somme(x1;x7)	= Somme(y1;y7)	
TOTAL en %	= Somme(x1;x7) * 100/500	= Somme(y1;y7) * 100/500	

Figure 3.13: Détermination du pourcentage global pour la qualité du mobilier.

Table 3.9: Classification de l'indicateur **C3 - Mobilier urbain**

		Qualité du mobilier	
		Insuffisamment ombragé	Suffisamment ombragé
Quantité du mobilier	Absent	TRÈS FAIBLE	FAIBLE
	Quantité insuffisante	FAIBLE	MOYEN
	Quantité suffisante	MOYEN	ÉLEVÉ

L'indicateur peut potentiellement être souvent très faible s'il y a peu de diversité de mobilier, ou si beaucoup de mobilier est considéré absent. Néanmoins, cet indicateur est intéressant car il donne un point de vue des usagers du quartier. Comme ce projet aura un impact sur leur qualité de vie il semble nécessaire de les inclure dans un indicateur. De plus, comme cet indicateur est évalué grâce à un sondage, il n'est pas forcément possible de pouvoir refaire un deuxième sondage avec les solutions envisagées pour réévaluer l'avis de la population. Ainsi, afin d'avoir quand même une évolution de cet indicateur en fonction des solutions proposées, il est recommandé d'augmenter de 1 le niveau d'adaptation de l'indicateur quand des aménagements en sa faveur sont proposés.

3.6 Définition des zones d'étude

Au vu de l'échelle de la matrice mise en place et des indicateurs sélectionnés, la méthodologie développée dans ce projet n'a pas été conçue pour être appliquée à une ville ou une commune dans leur entièreté. En effet, une ville est composée de quartiers très hétérogènes, allant de quartiers très bien adaptés au changement climatique, à des quartiers peu adaptés. Si la méthodologie était appliquée à la commune dans sa globalité les résultats de la matrice ne seraient alors que des moyennes ; les quartiers très bien adaptés compenseraient les quartiers très peu adaptés. Pour cette raison, il a été choisi d'étudier les villes à l'aide de zones homogènes. De plus, pour étudier la gestion des eaux au sein d'un territoire il est nécessaire de suivre le bassin versant, c'est une délimitation objective et physique.

Les zones seront alors découpées selon l'occupation et l'utilisation de l'espace par les usagers et les flux de population. Une zone comprendra toutes les rues, places, espaces ayant une même fonction au niveau des flux (fonction de passage, fonction de repos ...) et comprendra aussi les bâtiments à l'intérieur et autour de la zone pour avoir le micro-climat de la zone. Pour la gestion de l'eau, le bassin versant de la zone délimitée précédemment sera pris en compte en étudiant les zones de captage de l'eau de pluie, ainsi que les écoulements superficiels et dans les canalisations.

Finalement, la méthodologie peut être appliquée aux quartiers que la commune souhaiterait analyser en priorité ou à tous les quartiers.

3.7 Communication des résultats de la matrice

Une fois que les indicateurs ont été appliqués aux zones d'étude, la Matrice Bleue-Verte des zones en question est obtenue. Afin de pouvoir facilement communiquer les résultats de cette méthodologie à la population, un résultat visuel par thématique peut sembler intéressant. Une première solution serait de réaliser un visuel à l'aide d'un tableau récapitulatif des couleurs résultant de la modélisation de la matrice pour chaque indicateur. Toutefois, cette méthodologie peut sembler peu claire pour certaines personnes avec de nombreuses couleurs qui peuvent sembler oppressantes, avec trop d'informations.

Ainsi, afin d'avoir une représentation plus visuelle, un deuxième outil de communication est proposé : le diagramme en radar. Sur ceux-ci, la surface formée par la courbe varie en fonction des scénarios et se déplace vers les critères les plus élevés. Dans ce projet une valeur de 1 à 4 a été attribuée pour les quatre niveaux d'adaptation de très faible à élevé, respectivement, graduellement. Ainsi plus la surface sur le diagramme en radar est grande, plus le scénario modélisé est adapté aux effets du changement climatique. Cette représentation est plus intuitive en ce qui concerne la comparaison de scénarios car des courbes peuvent être superposées. Leurs aires et directions peuvent donc être comparées facilement. La figure 5.30 dans la partie 5.5.2 est un exemple de diagramme en radar utilisé pour l'analyse des scénarios.

Il est difficile de donner un poids à chaque indicateur. L'attribution de poids est subjectif et varie selon les parties prenantes du projet. Ainsi, afin d'avoir l'avis de chaque partie prenante, il serait intéressant d'effectuer une analyse multicritères du type AHP ou MCDA. Celles-ci permettent d'aider les acteurs à la décision d'évaluer et comparer les solutions possibles.

4. Identification de scénarios de mesures améliorant les résultats de la matrice

4.1 Étapes de l'étude de variante

La Matrice Bleue-Verte permet d'analyser le niveau d'adaptation d'une ville au changement climatique. Elle permet donc dans un premier temps d'analyser les indicateurs qui peuvent être améliorés et à quelle ampleur.

Pour les indicateurs de rétention et stockage, la Matrice Bleue-Verte permet de dimensionner les ouvrages nécessaires. Les ouvrages de rétention sont dimensionnés pour un temps de retour de 30 ans et un débit spécifique maximum de 20 L/s/ha. Leur volume est déterminé connaissant dans un premier temps l'infiltration de la zone d'étude puis en lui soustrayant le volume des canalisations. La matrice permet aussi de déterminer le volume de rétention nécessaire pour gérer les ruissellements d'une seule partie de la zone ; il suffit de modifier les surfaces correspondantes. Les ouvrages de stockage sont dimensionnés connaissant le volume des précipitations et le besoin des plantes en irrigation comme expliqué dans la partie 3.5.4.

Une fois qu'une analyse détaillée des résultats de tous indicateurs a été faite, que les objectifs à atteindre sont énoncés et que les volumes nécessaires sont connus, il est possible de regarder dans le catalogue de mesures (annexe 9.8) les solutions possibles à mettre en place pour améliorer ces indicateurs. Le choix des solutions se fait en fonction des objectifs à atteindre, de la faisabilité de la solution, donc du lieu (route à forte circulation, place, trottoir, lieu à fort/faible passage, ...), des possibles contraintes, de l'espace disponible, du coût, etc.

Sur la base de ces analyses, plusieurs scénarios peuvent être définis, chacun ayant potentiellement des aspects positifs et négatifs. Ces divers scénarios peuvent être quantifiés en termes d'adaptation au changement climatique à l'aide de la matrice afin de savoir leurs impacts sur les indicateurs et d'étudier plus en détail chaque variante. Une fois que chaque variante a été étudiée précisément avec ses qualités et désavantages, le choix final du scénario réalisé revient à la commune, collectivité selon l'axe qu'ils veulent suivre.

4.2 Catalogue de mesures

Lors de ce projet il a été intéressant de regrouper toutes les solutions techniques d'adaptation identifiées dans les diverses lectures. Chaque solution permet bien sûr d'agir sur différents indicateurs et donc différentes thématiques. Le schéma 4.1 résume l'action des diverses solutions techniques sur chaque mesure. Ces mesures répondent elles-même à des problématiques appartenant à diverses thématiques. Ainsi un catalogue composé de 14 solutions techniques pour l'adaptation des villes au changement climatique a été réalisé et est disponible en annexe 9.8. Il permet de répondre à un réel besoin des villes. Pour chaque solution, des informations concernant leurs bénéfices, contraintes, coûts ou encore des conseils de mise en place sont donnés, et des images de référence permettent de montrer à quoi elles ressemblent. De plus, un pictogramme permet d'énoncer clairement à quelles mesures répondent chaque solution, en référence à la figure 4.1.

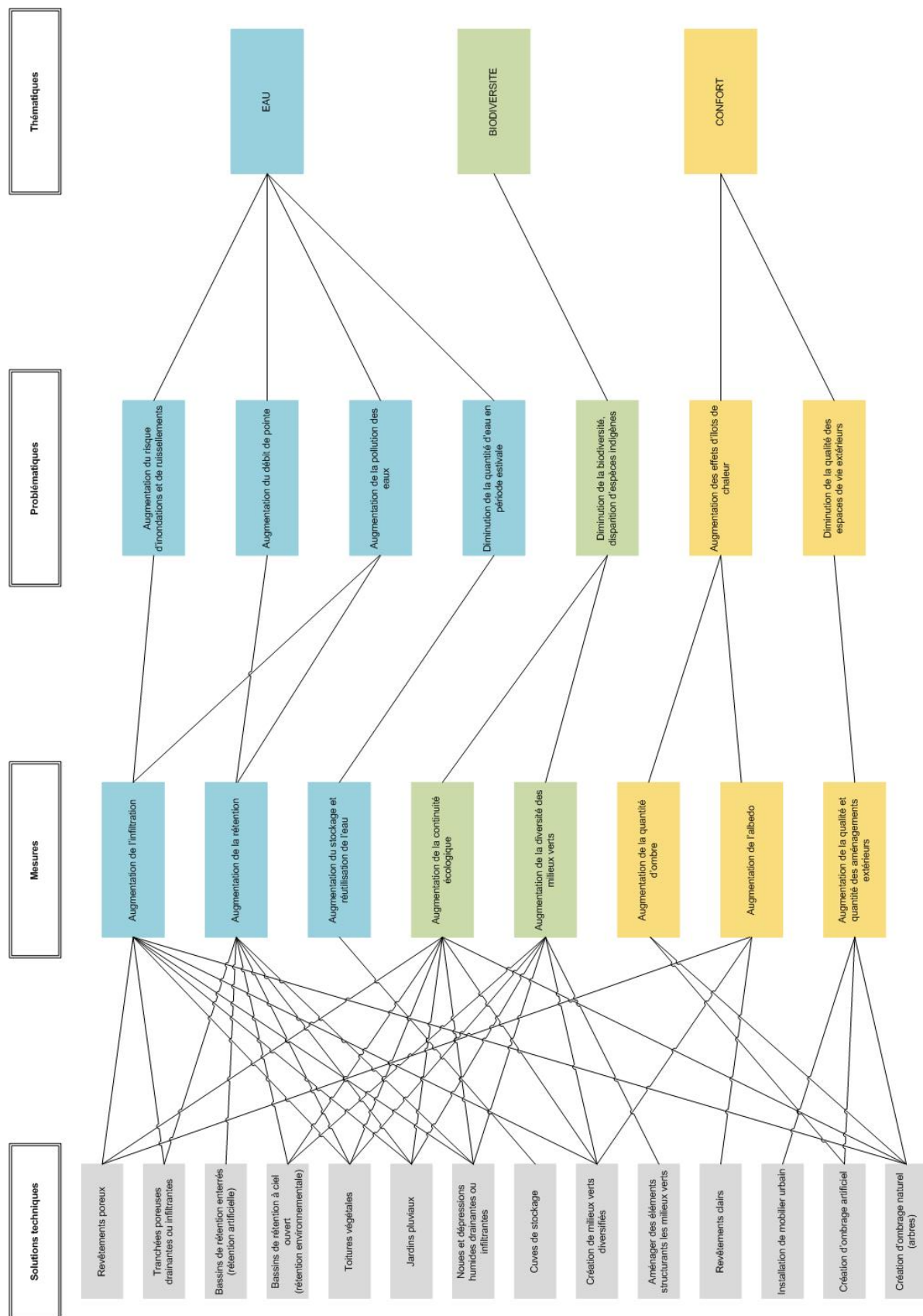


Figure 4.1: Résumé des différentes solutions techniques, des mesures auxquelles elles correspondent et des problématiques auxquelles elles répondent.

4.3 Contraintes hors du projet

Différentes contraintes n'ont pas été prises en compte dans cette méthodologie qui se veut être une étape de pré-projet simplifiée. Cependant certaines contraintes doivent être étudiées lors de l'étude plus approfondie du projet et des étapes supérieures.

L'installation de toitures végétalisées nécessite beaucoup de matériel (géomembrane imperméabilisante, couche de substrat, accumulation d'eau ...) qui peuvent alourdir la charge sur le toit. Ainsi il serait optimal de réaliser une étude de la structure des murs et des bâtiments afin de savoir quel poids peut être ajouté. Aussi, par leurs effets de rétention les toitures végétalisées accumulent de l'eau sur les toits. Il est nécessaire de s'assurer de l'étanchéité des toits sur lesquels il est prévu d'installer une toiture végétalisée.

De par l'ajout de canalisations comme par exemple de drain, il est nécessaire d'étudier le sous-sol de la zone d'étude. Par exemple analyser si il y a la présence de bâtiments en sous-sol, d'autres réseaux de tuyauterie et leur côte, ou encore vérifier la stabilité sous les voies de métro ou de chemins de fer par exemple.

De plus, l'infiltration de l'eau dans le sol ne dépend pas seulement du type de revêtement mais aussi de la porosité du sol. En effet, plus la porosité est faible, plus le sol va arriver à saturation rapidement. Ainsi il est nécessaire non seulement d'étudier en détails la composition géologique du sol mais aussi de réaliser des tests d'infiltration d'eau dans le sol. Celui-ci permettra de connaître exactement le taux d'infiltration du sol et de mettre en place un volume de rétention à la surface plus conséquent ou creuser une tranchée d'infiltration.

Finalement, une étude plus approfondie des lieux où la nappe phréatique remonte est nécessaire. En effet, les ouvrages de rétention doivent être au-dessus de la hauteur maximale à laquelle monte la nappe afin que le volume entier de la noue soit dédié aux eaux superficielles [Agence de l'eau Rhin-Meuse , 2021].

En somme, la Matrice Bleue-Verte fait un premier état des lieux de la situation actuelle mais des réflexions inhérentes aux installations et à la planification globale du quartier doivent être faites.

5. Cas d'application : le campus EPFL

5.1 Une volonté de renforcer sa culture de durabilité forte au sein de son établissement

L'EPFL, en tant qu'établissement d'enseignement supérieur reconnu et en tant qu'entité publique, a une ambition d'accompagner de manière durable la forte croissance de l'EPFL et d'être parallèlement un exemple à l'international en termes de durabilité. Ainsi en 2007 une unité a été créée au sein de la Vice-Présidence pour la Transformation responsable (VPT) appelée l'unité Durabilité. Cette entité a permis par exemple la rédaction d'un plan d'action Climat 2030 EPFL, ou la mise en place de divers projets comme une plateforme de création de projets en durabilité pour les étudiants (Act For Change LAB), le projet Resilient Campus ayant pour but l'adaptation des aménagements extérieurs au changement climatique, ou encore la valorisation du patrimoine agricole dans une démarche agro-écologique participative (projet Urban Farming) [Durabilité EPFL, 2021]. Ces projets globaux ont permis la mise en place d'éléments concrets comme des bacs potagers implantés sur la Place Nord ou la création d'un Point Vélo. Aussi une réflexion sur un plan de mobilité professionnelle afin de limiter les voyages en avion est en route [Durabilité EPFL, 2018].

Le campus EPFL étant étroitement lié au campus UNIL, physiquement et par leur activités similaires, un Schéma directeur des Hautes Ecoles (SDHE) a été rédigé afin d'avoir une ligne directrice face à l'évolution de cette zone universitaire. En effet, lors des prochaines années, elle fera face à l'augmentation du nombre d'étudiants et une évolution dans la manière d'enseigner, donc devra faire preuve d'adaptabilité, tout en gardant une qualité de vie agréable sur le campus et en se préparant à des événements météorologiques plus extrêmes et fréquents. Pour ce faire, le projet "Quel campus pour 2050 ?" est né. Cette démarche participative a permis de confronter les parties prenantes à de nombreuses thématiques comme par exemple la nature, les espaces publics, les infrastructures, les considérations sociales ou encore la mobilité [UNIL-EPFL, 2021].

Un diagnostic général a donc déjà été fait sur le campus UNIL-EPFL, avec une planification générale d'aménagement à grande échelle. Toutefois ce microcosme universitaire permettra de tester la Matrice Bleue-Verte réalisée afin de l'affiner, qualifier plus précisément le niveau d'adaptabilité du campus et proposer des mesures concrètes sur des parcelles plus précises.

De plus, différents laboratoires s'intéressent à l'adaptation des zones urbaines au changement climatique, à leur durabilité, leur confort et au domaine des Smart-City plus généralement. Le laboratoire LESO-PB (Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment) a été à l'origine de la mise en place d'un mur d'eau de refroidissement sur le campus pour analyser son effet sur le confort thermique [Laboratoire LESO-PB, 2021] ou encore de la publication de nombreux articles d'étudiants et doctorants sur le sujet. Ces articles étudient le confort thermique en milieu urbain en réalisant des cas d'étude sur le campus EPFL. Ainsi, [Ardizzone et al., 2019] et [Boesch, 2019] ont étudié l'effet de la végétation sur le confort thermique au niveau du Rolex Learning Center et du SwissTech Convention Center. [Mauree et al., 2016] montre l'effet du vent sur le confort thermique avec comme cas d'étude l'esplanade devant le SwissTech Convention Center et l'espace ouvert à l'ouest du bâtiment GR. Finalement, [Coccolo, 2017] quantifie le nombre d'heures de confort sur l'entièreté de l'espace extérieur du campus EPFL. Un autre exemple de laboratoire s'intéressant à la question est le laboratoire HERUS (Human-Environment Relations in Urban Systems) qui étudie la durabilité des villes avec une approche systémique [Binder et al., 2020].

Sur le campus de l'UNIL, adjacent à l'EPFL et avec lequel de nombreux projets sont réalisés, un inventaire détaillé de la biodiversité du campus a été réalisé entre 2017 et 2021. Celui-ci a permis de constater une érosion de la biodiversité et aura notamment pour but d'orienter la gestion des espaces verts du campus de l'UNIL [Séchaud et al., 2021].

5.2 Zones d'études

Ce cas d'application avait pour but dans un premier temps de tester les indicateurs de la Matrice Bleue-Verte, affiner si besoin les échelles de ces indicateurs et les valider. Pour cela il est nécessaire de faire ces tests dans des zones très différentes en termes d'usages et donc d'infrastructures pour voir si la matrice est adaptée à tout type de zone. Dans cette optique trois types de zones seront étudiées :

- Une zone à forte affluence avec un temps de passage relativement long ($\approx 1h$).
- Une zone à forte affluence avec un temps de passage relativement court ($\approx 15min$).
- Une zone à très faible affluence.

Cette première zone à forte affluence avec un temps de passage relativement long sera représentée par l'espace allant de l'esplanade jusqu'au Rolex Learning Center (RLC), en passant par l'agora. En effet c'est un lieu où les étudiants et collaborateurs de l'EPFL s'y rendent pour de nombreuses pauses et notamment le repas du midi dû à la présence des roulottes sur l'agora et de ses nombreuses places assises. Le bassin versant de cette zone a une surface légèrement inférieure à la zone en elle-même. Cette zone, appelée zone SUD, et son bassin versant sont représentés sur la figure 5.1.

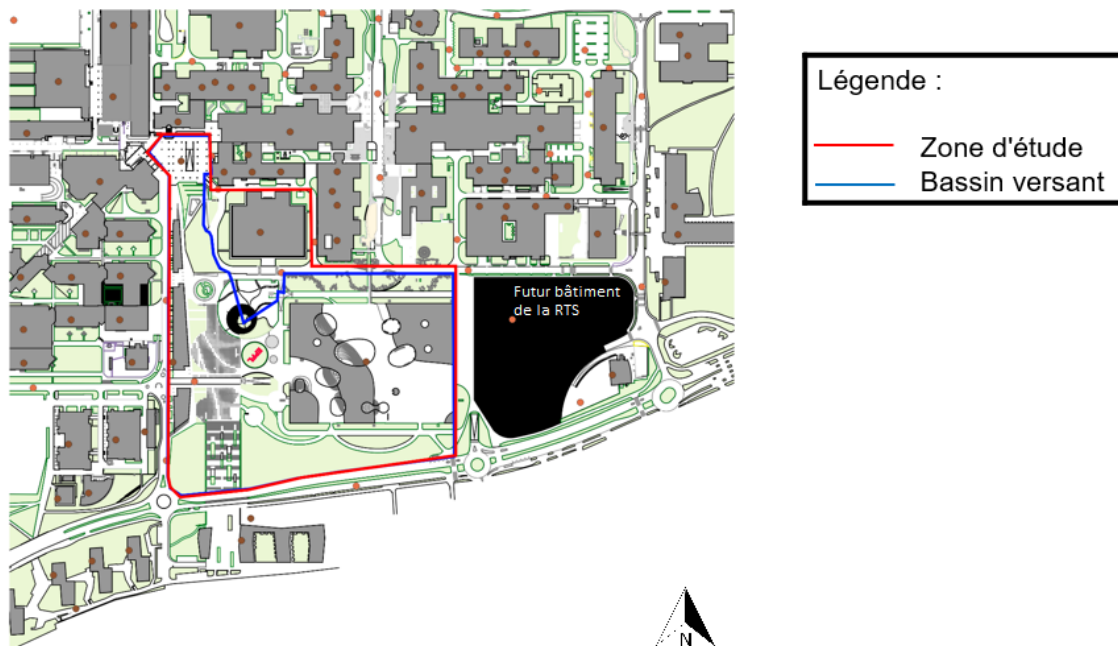


Figure 5.1: Carte représentant la zone sud et son bassin versant.

La zone à forte affluence mais avec un temps de passage relativement court sera représentée par l'avenue Piccard. En effet cette rue connaît un fort passage avec le RLC (attirant de nombreux étudiants et collaborateurs pour l'offre littéraire, les places de travail, la boutique et les restaurants dont il est composé) à une extrémité et l'accès au métro à l'autre extrémité. De plus, cette rue comporte un magasin alimentaire, un restaurant et jusque très récemment la poste, ce qui fait d'elle un point de passage régulier pour les usagers. Cette zone, appelée zone EST, s'étend tout le long de l'avenue Piccard et des bâtiments qui la borde et est représentée sur la figure 5.2. Le bassin versant de cette zone s'étend plus loin vers l'ouest du campus, recueillant l'eau de pluie s'écoulant du bâtiment CM. De plus cette avenue est très intéressante car Durabilité EPFL a carte blanche pour y proposer et réaliser des aménagements. C'est donc l'opportunité parfaite de la modéliser à l'aide de la matrice, étudier les qualités et potentiels d'amélioration et proposer des solutions réalisables.

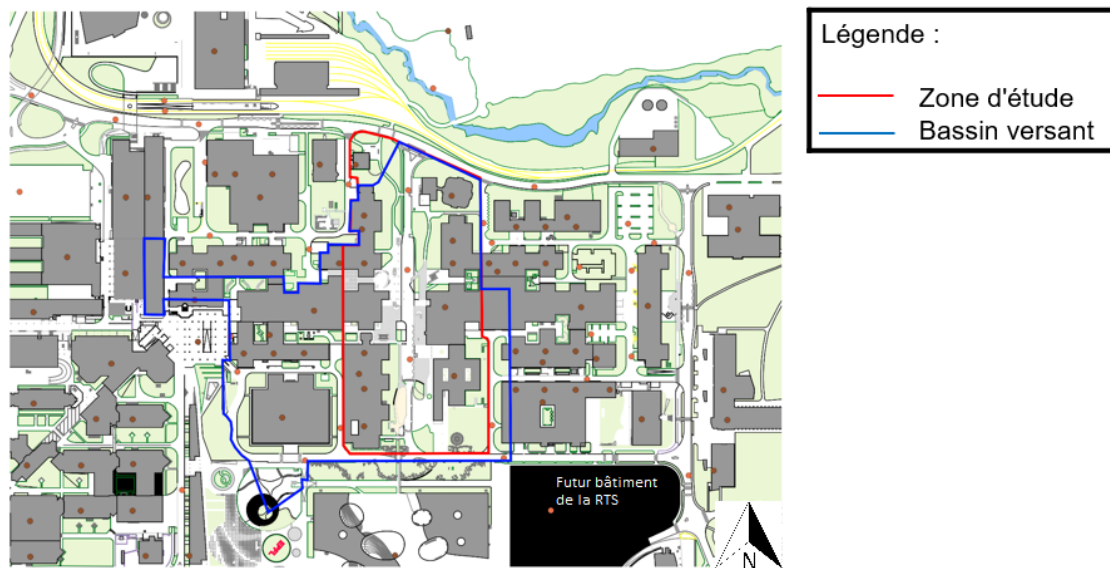


Figure 5.2: Carte représentant la zone est et son bassin versant.

Finalement, la zone à très faible affluence est composée du parking au nord du campus et des bâtiments aux alentours. En effet, mis à part les quelques personnes qui garent leur voiture sur ce parking, personne ne vient passer un moment de récréation dans ces environs. Dans le meilleur des cas les usagers y passent car c'est le plus court chemin vers leur destination. Cette zone, appelée zone NORD est représentée sur la figure 5.3. Le bassin versant quant-à-lui s'étend de l'autre côté des rails de métro, vers le Swiss Tech Convention Center (STCC).

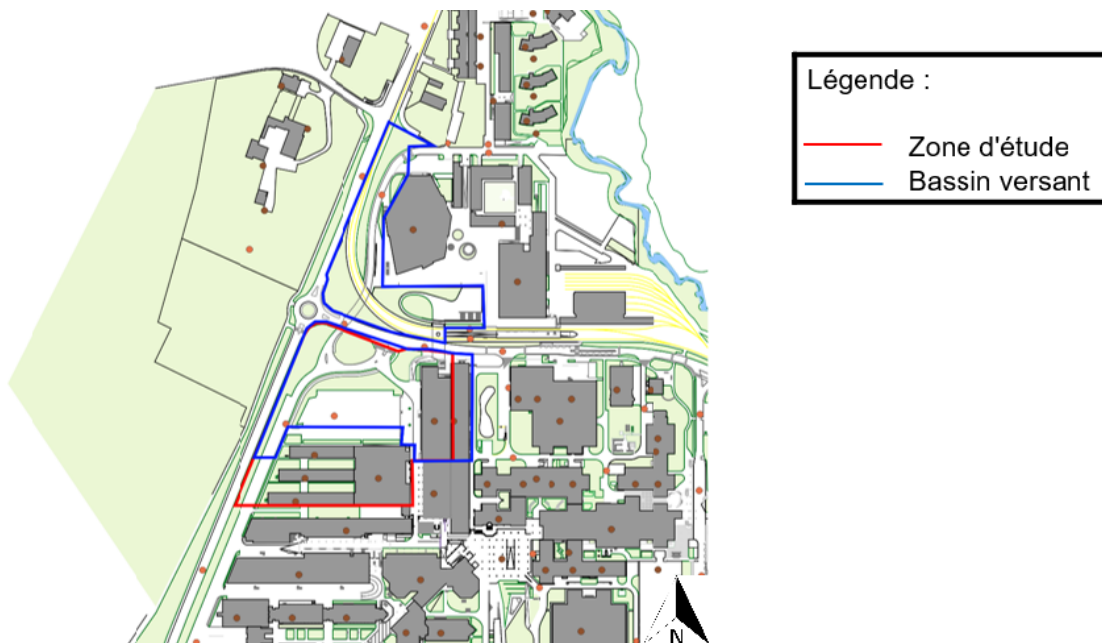


Figure 5.3: Carte représentant la zone nord et son bassin versant.

5.3 Données utilisées

L'EPFL offre un portail de services et support pour tout type de besoins. Grâce à celui-ci il a été possible d'obtenir divers plans et données pour l'analyse des indicateurs :

- Fond de carte du campus et de la végétation extérieure, géoréférencé. [Format .dwg]
Importé dans QGIS, ce fond de carte a permis de calculer les distances et aires nécessaires des espaces extérieurs, ainsi que de représenter les ouvrages et aménagements proposés en solution, comme expliqué dans la partie 5.3.1.
- Plan des bâtiments du campus. [Format .dwg]
Dans AutoCAD ce plan a permis de connaître les aires des bâtiments.
- Plan des aménagements extérieurs du campus, niveau sol, faisant figurer les différentes catégories de milieux verts (haies, prairies de fauche, bacs plantés, grille gazon, ...). [Format .pdf]
Ce plan a permis de visualiser en détails tous les milieux verts, ainsi que de les catégoriser précisément pour l'analyse de la biodiversité.
- Plans des aménagements extérieurs du campus pour les quatre niveaux de toitures faisant figurer les différentes catégories de milieux verts (bacs plantés, toitures extensives, ...). [Format .pdf]
De la même manière, ce fichier a permis de connaître précisément le type de milieu vert sur chaque toiture du campus.
- Plan du réseau des canalisations d'eaux claires et eaux usées du campus comprenant les types de conduites, leur diamètre, les grilles, les chambres de visite, etc. [Format .dwg]
Ce plan a permis d'analyser les bassins versants du campus, le sens des écoulements et les lieux potentiels pour installer des ouvrages bleus-verts de gestion des eaux.
- Plan 3D des bâtiments du campus. [Format .dwg] Dans AutoCAD, ce plan a permis de connaître la hauteur des bâtiments, notamment pour calculer l'albedo, mais aussi pour connaître la distance entre certains milieux verts.

Aussi, un sondage a été réalisé auprès des usagers du campus afin d'analyser l'indicateur *Mobilier urbain*, et plusieurs visites de terrain ont été réalisées. Des informations complémentaires ont été apportées lors de discussions avec les représentants de Durabilité EPFL ou du service de Développement et Construction de l'EPFL.

D'autres données ont été utilisées pour la deuxième partie de projet, afin de déterminer des scénarios de mesures réalisables :

- Carte des eaux et sites pollués du guichet cartographique du canton de Vaud.
Elle a permis d'étudier si le campus EPFL est proche d'une aire d'alimentation en eau potable, ainsi que les zones et secteurs de protection des eaux sur lesquels il est installé. Ces données ont permis de connaître le niveau d'infiltration autorisé sur le campus.
- Carte de l'aléa de ruissellement de la Confédération Suisse.
Celle-ci livre une vue d'ensemble des zones inondables en Suisse selon un temps de retour supérieur à 100 ans.
- Sondages pédologiques du terrain De multiples sondages ont été réalisés depuis les années 1980 sur le site de campus EPFL. Ceux-ci permettent de donner une idée des couches géologiques à certains endroits, où des solutions techniques veulent être implantées. Ainsi il est possible de faire des hypothèses sur la perméabilité du sous-sol à ces endroits.
- Profil du terrain depuis le portail géographique de la confédération. Pour connaître la topographie et le sens des écoulements des eaux de pluie, des profils ont été tracés depuis le portail géographique de la Suisse.

Finalement des données inexistantes pour le campus EPFL ont manqué à l'analyse :

- Aujourd'hui, aucun PGEE n'existe pour le campus. Cependant des démarches sont en cours de réalisation pour en élaborer un. Le PGEE de la ville d'Ecublens étant lui aussi en cours

de réécriture, c'est le PGEE de la ville de Lausanne qui a été utilisé. Toutefois en ce qui concerne le dimensionnement des ouvrages de rétention, les valeurs sont semblables d'un PGEE à un autre pour des communes voisines.

- Il n'a pas été possible d'obtenir de fichier recensant la profondeur des canalisations dans le sous-sol. Ces données auraient été nécessaires afin de pouvoir valider les mesures d'adaptation proposées, notamment au niveau des raccordements entre les ouvrages de gestion des eaux pluviales.

5.3.1 QGIS comme outil de visualisation des données

QGIS est un logiciel de système d'information géographique libre et open-source permettant de visualiser, modifier et analyser des données géospatiales. Lors de ce projet, le besoin de modifier des données géospatiales est limité, par contre pour la visualisation et l'analyse des données, ce logiciel est optimal.

Les fonds de carte obtenus en *.dwg* ont tout d'abord pu être importés dans le logiciel et ont été géoréférencés afin d'avoir des distances correctes. Ensuite, pour chaque zone d'étude un GeoPackage a été créé afin d'y rassembler toutes les couches utiles à l'analyse de cette zone. Ces différentes couches représentent par exemple les différents types de revêtements (figure 5.4).

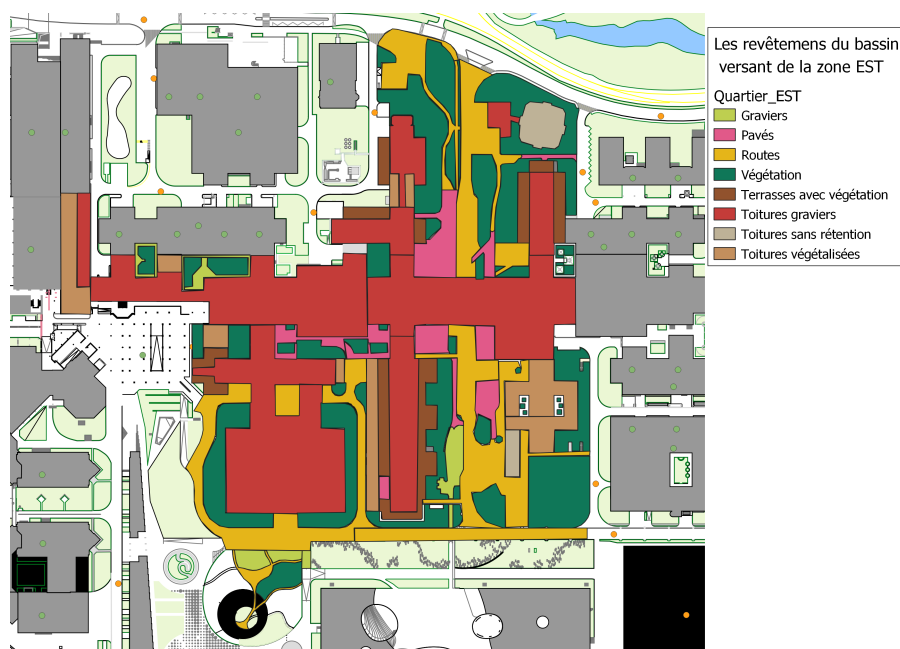


Figure 5.4: Carte représentant le bassin versant de la zone EST et tous les revêtements dont il est composé.

Chaque couche comporte des polygones délimitant les petites parcelles de chaque type de milieux. Donc une couche contient au minimum un polygone et puis autant que nécessaire. Chaque polygone est un objet qui peut avoir plusieurs attributs. Les attributs sont par exemple le type exact de revêtement (végétation_prairie, végétation_forêt, ...) ou encore l'aire de chaque polygone (figure 5.5). Ainsi l'outil "calculatrice" permet de connaître facilement l'aire totale d'une couche ou de la somme de certains polygones seulement.

QGIS permet aussi de réaliser des cartes afin de représenter et communiquer sur le projet élaboré. Des indications comme l'échelle, la légende, une rose des vents, etc. peuvent être ajoutées. Lors de ce projet des cartes ont été réalisées afin de pouvoir communiquer sur les zones d'études choisies et leurs délimitations (figures 5.2, 5.3 et 5.1).

	fid	Aire	Type
1	9	603.39	Vegetation_bois
2	8	1312.13	Vegetation_herbe
3	7	32.69	vegetation_ruderales
4	6	45.57	Vegetation_ruderales
5	50	54	Vegetation_bois
6	5	158.19	Vegetation_bois
7	49	83	Vegetation_bois
8	48	1253	vegetation_herbe
9	47	365	Vegetation_herbe
10	46	1009	Vegetation_herbe
11	45	103.73	Vegetation_bois
12	44	68	Vegetation_ruderales

Figure 5.5: Extrait de la table d'attributs de la couche *Végétation*.

5.4 Application de la Matrice Bleue-Verte aux différentes zones du campus

Un plan de l'EPFL en annexe 9.9 permettra de situer les bâtiments mentionnés avec leurs initiales dans les paragraphes suivants.

5.4.1 Résultats zone EST

Cette zone du campus est composée des bâtiments les plus anciens du campus qui ont tous une architecture semblable. Ils sont composés de terrasses avec de larges bacs de végétation ayant une profondeur de 50 centimètres environ (figure 5.7). De plus, ils se caractérisent par leurs toits plats, recouverts de graviers et de panneaux solaires pour une majeure partie (figure 5.6). Les résultats de la modélisation de la Matrice Bleue-Verte appliquée à cette zone apparaissent dans la figure 5.8.



Figure 5.6: Photographie des toits plats du CM, recouverts de graviers et panneaux solaires. ©Loé Maire



Figure 5.7: Photographie des terrasses végétales sur les plus vieux bâtiments du campus. ©Durabilité EPFL

Zone EST		
E1 - Infiltration		Ci moyen = 51% * Ci optimal
E2 - Rétention		Vactuel_retention = 0% * Vthéorique_retention
E3 - Stockage		Vactuel_stockage = 0% * Vthéorique_stockage
B1 - Continuité écologique		PCactuelle = 10% PCoptimale
B2 - Diversité des milieux		4 milieux ; H' > 50%ln(N)
C1 - Albedo		$\alpha = 0.30$ [-]
C2 - Ombre		Pombre = 35%
C3 - Mobilier urbain		Mobilier principalement absent et non ombragé

Figure 5.8: Résultats de la Matrice Bleue-Verte appliquée au quartier EST.

Aujourd'hui aucun ouvrage de rétention des eaux pluviales ou de stockage des eaux n'existe dans cette zone. Les eaux de pluies collectées dans ce bassin versant s'écoulent depuis les canalisations latérales vers la canalisation centrale de l'avenue Piccard, avant de se jeter dans la Sorge au nord du campus. Ces canalisations ne sont pas suffisantes pour maîtriser tout le ruissellement. Ainsi les indicateurs E2 et E3 apparaissent rouge. De plus, les grandes toitures plates du CM et CE qui sont raccordées à ce bassin versant sont toutes composées de graviers 5.6 et n'ont donc pas une grande fonction d'infiltration malgré leur grand potentiel de végétalisation.

Cette zone a deux espaces de végétation plutôt conséquents : un espace boisé au nord et un espace de prairie au sud. Bien qu'elle soit aussi composée de nombreux espaces de végétation au sol et en terrasses, ceux-ci restent de petite taille et très ponctuels. Par exemple des arbres ont été plantés dans le cadre de la campagne "50 arbres pour les 50 dans l'EPFL". Toutefois ceux-ci ont un faible espace de substrat dans le sol permettant leur croissance, ainsi que seulement un espace de $6m^2$ de substrat à la surface du sol avant d'être entourés de surface pas ou peu perméables (figure 5.9 et 5.10). Ainsi leurs effets dans l'indicateur B1 est limité. Aussi cet indicateur de continuité écologique a comme référence la probabilité de continuité théorique. Celle-ci est basée sur des toits plats entièrement végétalisés et des façades végétalisées. Malgré que les toits plats de l'EPFL aient un grand potentiel de végétalisation, ils ne sont pas exploités, ce qui donne un indicateur de continuité écologique très faible.



Figure 5.9: Photographie de l'implantation des 50 arbres pour les 50 ans de l'EPFL. ©Durabilité EPFL



Figure 5.10: Photographie d'un arbre récemment implanté sur le campus. ©Loé Maire

Quatre toitures appartenant à ce bassin versant sont partiellement végétalisées : une partie du toit du bâtiment BM, du toit du bâtiment BI, du toit du bâtiment GR et l'aile ouest du bâtiment MA. Cependant ces toitures ont à peine 10 centimètres de substrat comme le montre les figures 5.11 et 5.12. Sur le toit du bâtiment BM il y a eu une envie de végétaliser, cependant avec un substrat si faible, seulement des plantes grasses, mousses et lichens ont pu s'implanter et aucune présence de faune n'est visible dans l'espace aérien (papillons, oiseaux, abeilles, ...), mais potentiellement quelques coléoptères ou fourmis peuvent y être installés (figures 5.13 et 5.14). Ainsi la diversité des espèces y est faible et le potentiel de créer un réel espace de biodiversité est élevé. Augmenter l'épaisseur du substrat et assurer une bonne perméabilité permettrait d'augmenter le pouvoir de rétention des toitures.

Les nombreuses zones boisées, au nord de la zone et le long des chemins piétons offrent une quantité d'ombrage plutôt satisfaisante. Le sondage montre que les avis sur la zone sont très divergents. Mais il est possible de relever un manque de mobilier qui n'invite pas particulièrement les usagers à y passer du temps de récréation.



Figure 5.11: Photographie de l'épaisseur du substrat sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire



Figure 5.12: Photographie de l'épaisseur du substrat sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire



Figure 5.13: Photographie du type de végétation sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire



Figure 5.14: Photographie du type de végétation sur les toits de l'EPFL. ©Loé Maire

5.4.2 Résultats zone NORD

La zone NORD est un espace peu visité par les étudiants et collaborateurs de l'EPFL. En effet, hormis les 200 personnes qui garent leur voiture sur le parking chaque jour (figure 5.15), les riverains ne passent par là seulement si c'est le trajet le plus court. Le sondage réalisé auprès de la communauté EPFL relève en effet du manque d'installations pouvant permettre aux riverains d'y passer du temps. Le retour du sondage laisse penser qu'installer du mobilier dans cette zone inciterait les riverains à y passer du temps et utiliser cet espace pour leur temps de récréation. En effet les espaces entre les ailes AAB, AAC et AAD du bâtiment architecture ont du potentiel. Verts et en partie ombragés grâce aux bâtiments, ces espaces ne manquent que de mobilier de type bancs ou tables pour inviter les étudiants et collaborateurs à venir y passer du temps. Toutefois la présence d'ombre dans la zone d'étude est faible dû au fait qu'un grand parking couvre une large partie de la zone. L'indicateur de l'albedo (figure 5.17) a un très bon résultat car c'est une zone ouverte, entourée de peu de bâtiments et des bâtiments enduits de blanc, ce qui compense le faible albedo provenant des revêtements bitumineux. Ainsi il y a un grand potentiel pour développer cet espace large et ouvert.



Figure 5.15: Photographie du parking recouvrant une majorité de la zone NORD. ©Loé Maire



Figure 5.16: Photographie du type de végétation présent dans la zone NORD. ©Loé Maire

Zone NORD		
E1 - Infiltration		Ci moyen = 61% * Ci optimal
E2 - Rétention		Vactuel_retention = 0% * Vthéorique_retention
E3 - Stockage		Vactuel_stockage = 0% * Vthéorique_stockage
B1 - Continuité écologique		PCactuelle = 49% PCoptimale
B2 - Diversité des milieux		4 milieux ; H' > 50%ln(N)
C1 - Albedo		$\alpha = 0.38$ [-]
C2 - Ombre		Pombre = 19%
C3 - Mobilier urbain		Mobilier principalement absent et non ombragé

Figure 5.17: Résultats de la Matrice Bleue-Verte appliquée au quartier NORD.

Malgré que cette zone soit composée d'un grand parking, de grands espaces verts aux alentours permettent d'obtenir un indicateur d'infiltration plutôt bon (figure 5.16). Toutefois il y a un réel manque de rétention pour compenser les ruissellements restants, et aucun ouvrage de stockage des eaux pour alimenter les espaces verts. Il y a notamment un risque élevé d'inondation sur la route Louis-Favre au niveau de son passage sous la route de la Sorge.

Finalement, ce large parking crée un obstacle considérable à la biodiversité, ce qui affaiblit l'indicateur de continuité écologique. La présence de zones boisées, milieux rudéraux, prairies entretenues et toitures végétalisées permettent une diversité plutôt satisfaisante de milieux verts. Toutefois, comme les toitures végétalisées dans la zone EST, celles présentes ici ont un substrat très faible et pourraient être développées de façon à augmenter leurs bénéfices aussi bien du côté biodiversité que gestion des eaux.

La modélisation réalisée avec la Matrice Bleue-Verte a permis de définir que l'amélioration de la gestion des ruissellements sera le principal objectif des solutions réfléchies.

5.4.3 Résultats zone SUD

La zone SUD est généralement vue d'une manière différente par la communauté EPFL. En effet, elle est généralement utilisée comme espace de récréation. Composée de nombreux espaces verts de type prairies, visibles sur les figures 5.18 et 5.19, elle offre de nombreux lieux de détente. Ces espaces verts sont fauchés deux fois par an et laissés la majorité du temps libre de se développer et accueillir de la biodiversité. Ainsi, l'infiltration obtenue par modélisation de la Matrice Bleue-Verte (figure 5.20) est très bonne. Toutefois, comme pour le reste du campus, aucun élément de rétention ne permet de compenser les eaux de ruissellement qui ne sont pas infiltrées dans le sol. De plus, ces grands espaces de végétation entraînent un besoin en eau très conséquent, qui n'est comblé par aucune cuve de stockage. Paradoxalement, les arbres plantés récemment dans le cadre de la campagne "50 arbres pour les 50 ans de l'EPFL" sont arrosés plusieurs fois pendant les étés par des camions citernes venant livrer de l'eau. Une gestion multifonctionnelle et une vision globale de l'espace et des aménagements permettraient d'éviter ces paradoxes.



Figure 5.18: Photographie du type de végétation présente dans la zone SUD. ©Loé Maire



Figure 5.19: Photographie du type de végétation présente dans la zone SUD. ©Loé Maire

Zone SUD		
E1 - Infiltration		Ci moyen = 82% * Ci optimal
E2 - Rétention		Vactuel_retention = 0% * Vthéorique_retention
E3 - Stockage		Vactuel_stockage = 0% * Vthéorique_stockage
B1 - Continuité écologique		PCactuelle = 49% PCoptimale
B2 - Diversité des milieux		3 milieux ; H' < 50%ln(N)
C1 - Albedo		$\alpha = 0.29$ [-]
C2 - Ombre		Pombre = 19%
C3 - Mobilier urbain		Mobilier principalement absent et non ombragé

Figure 5.20: Résultats de la Matrice Bleue-Verte appliquée au quartier SUD

L'indicateur de continuité écologique reste tout de même faible car la probabilité de continuité théorique est basée sur des toits plats végétalisés et façades végétalisées. Les parties plates du toit du Rolex Learning Center (RLC) seraient en mesure d'accueillir de la végétation. De plus, malgré les grandes surfaces de prairies, la diversité des milieux reste relativement faible car peu d'autres milieux verts ne sont représentés. Par exemple, bien que cette zone soit en grande partie couverte de végétation et soit un espace de détente, très peu d'espaces boisés sont présents. Ainsi, le sondage a relevé des remarques négatives de la part des usagers concernant le manque crucial d'ombre dans cet espace (figure 5.21). L'indicateur d'ombre est moyennement faible car il prend en compte les zones ombragées accessibles sous le RLC, visibles sur la figure 5.22. Toutefois au

vu de l'absence d'espaces boisés dans cette zone, il est facilement compréhensible d'y observer un manque d'ombre. Finalement, l'albedo de la zone d'étude est plutôt élevé car l'espace est très ouvert, entouré de peu de bâtiments sombres et de beaucoup de végétation.



Figure 5.21: Photographie du manque d'ombre dans la zone SUD. ©Loé Maire



Figure 5.22: Photographie des espaces ombragés artificiels sous le RLC. ©Loé Maire

Ainsi, au vu des résultats obtenus grâce à la modélisation de la matrice, l'amélioration de l'ombre et du mobilier urbain et de la rétention seront les objectifs principaux recherchés dans les solutions apportées.

5.5 Propositions de mesures d'amélioration

Possibilités d'infiltration sur le campus

Afin de savoir s'il est possible ou non d'installer des ouvrages d'infiltration sur le campus, il est nécessaire de regarder les directives du VSA et les lois d'infiltration. Le géoportail d'Ecublens [Commune d'Ecublens, 2021] met à disposition une carte des eaux et sites pollués. Sur cette carte il est possible de voir les zones ou secteurs de protection des eaux sur lesquels se situe le campus EPFL. Aucune zone de captage n'est présente sur le site et aucune zone de protection des eaux ne touche le site. En effet, le site se trouve entièrement sur le secteur de protection des eaux üB. Ce secteur n'impose pas de mesures particulières de protection. Toutefois, les dispositions générales de la législation en matière de protection des eaux doivent y être appliquées, comme le principe de diligence et l'interdiction de polluer les eaux.

De plus, après avoir vérifié si il est légalement possible d'infiltrer, il est nécessaire de vérifier la perméabilité du sous-sol. Pour ce faire, des données de sondages pédologiques peuvent être utiles. Pour le cas du campus, des sondages datant de 1980-1990 réalisés sur la partie sud-est du campus pas encore construite à cette époque là, ont été obtenus. Ainsi l'étude de la perméabilité est relativement approximative mais un premier constat peut être réalisé. De manière générale, les premières couches du sous-sol sont composées de limons et sables fins. Ainsi la perméabilité est entre bonne et moyenne. Plus en profondeur le sol est généralement fait de moraine donc limon argileux, sableux et graveleux. La perméabilité est alors plutôt moyenne. Donc pour des ouvrages d'infiltration de 1 à 2 mètres de profondeur c'est tout à fait possible d'infiltrer l'eau. Tout de même, il peut être intéressant de réaliser des tests de perméabilité aux emplacements précis des futurs ouvrages d'infiltration. En effet, d'après [Chocat et al., 2020] les sols ont généralement de grandes variations de perméabilité à quelques mètres de profondeur. Il est recommandé de réaliser des sondages aux endroits exact où des ouvrages sont implantés, entre 1 à 3 pour 1000m² d'ouvrage d'infiltration.

5.5.1 Solutions zone EST

Durabilité EPFL ayant carte blanche pour refaire entièrement cette avenue, l'hypothèse de départ émise qui indique que les aménagements installés ne doivent pas être au détriment de l'affectation des parcelles ne s'applique pas ici. Cette zone peut être traitée différemment et des solutions plus larges peuvent être instaurées, en modifiant les accès et l'affectation de parcelles. Notamment la grande modification envisagée serait de piétonniser complètement l'avenue. Les bus seraient déviés et une voie d'accès serait gardée pour les secours uniquement.

La Matrice Bleue-Verte a permis de mettre en avant les points à améliorer dans cette zone, et notamment l'indicateur de rétention. Elle a permis aussi de modéliser le volume nécessaire pour gérer les ruissellements. Dans un premier temps, le volume nécessaire pour capter le ruissellement de tout le bassin versant a été modélisé. Un volume de 1100m^3 aurait été nécessaire. Cependant non seulement ce volume est très élevé, mais il est aussi évident qu'il sera compliqué de capter 100% du ruissellement du bassin versant total (surtout que celui-ci est très large). Ainsi deux autres modélisations ont été réalisées : le volume de rétention nécessaire pour gérer les eaux de ruissellement de l'espace façade à façade et ceux provenant de l'espace de la zone de confort (l'espace façade à façade ainsi que l'eau ruisselante des toitures des bâtiments adjacents). Dans le premier cas le volume de rétention est de 160m^3 et dans le deuxième de 600m^3 . Ainsi, il a été estimé que proposer 600m^3 de rétention dans cet espace est réalisable. Ce volume correspond au niveau utile maximal. Toutefois une revanche de sécurité sera dimensionnée à Q100 ($Q100 = 900\text{m}^3$). Celle-ci se déversera dans le réseau de canalisation des eaux claires actuel adjacent. Bien que les hauteurs des canalisations dans le sol ne soient pas connues, il est supposé de manière générale qu'il faut au minimum un mètre de hauteur de sol au-dessus des canalisations d'eaux claires en milieu urbain.

Cette zone a un grand potentiel. En effet, une canalisation parcourt toute l'avenue Piccard du sud au nord (figure 5.23), accueillant les canalisations des eaux claires venant des bâtiments latéraux et se jetant par la suite dans la Sorge. Ainsi il est facile de s'imaginer un système de rétention-infiltration plus naturel qui compléterait cette canalisation.



Figure 5.23: Canalisation centrale parcourant toute l'avenue Piccard.

Ainsi, deux scénarios ont été imaginés. Leur vue en plan est représentée sur les figures 5.24 et 5.25. Le premier scénario comporte deux noues parcourant toute l'avenue Piccard du sud au nord. Deux jardins pluviaux augmenteraient la surface d'infiltration-rétention. Leurs dimensions sont résumées dans le tableau 5.1. Ces différents ouvrages permettent d'une part de gérer le ruissellement des eaux pluviales, mais apporteraient en plus de la biodiversité, de la fraîcheur et un espace de détente à cette avenue. Au centre, la voie d'accès pour les pompiers en revêtement imperméable, de 4 mètres de large, servirait aussi d'accès pour les personnes à mobilité réduite ou le transport des chariots à travers l'EPFL. Le long des noues, des espaces de détente composés de bancs et végétation seraient aménagés et les chemins d'accès seraient composés d'un revêtement perméable. Aujourd'hui il existe tout de même des flux de passage ouest-est. Ainsi, afin de pouvoir traverser les noues, des passerelles seraient installées aux endroits de passage qui sont aujourd'hui les plus communs. Ce scénario a été représenté sur deux coupes différentes dans les figures 5.26 (coupe 1) et 5.27 (coupe 2) (les lieux où les coupes ont été faites sont représentés sur la figure 5.24). La coupe 1 a été réalisée au niveau du jardin pluvial, et la seconde au niveau des passerelles permettant le passage des usagers. En annexe 9.10 les détails des ouvrages de sortie sont représentés. Une canalisation qui permet de vidanger la noue ainsi qu'une surverse de sécurité dimensionnée à Q100 se déversent dans la canalisation existante.

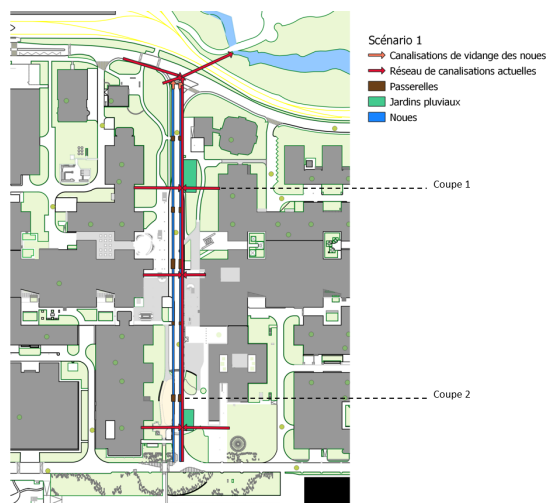


Figure 5.24: Vue en plan - Scénario 1.

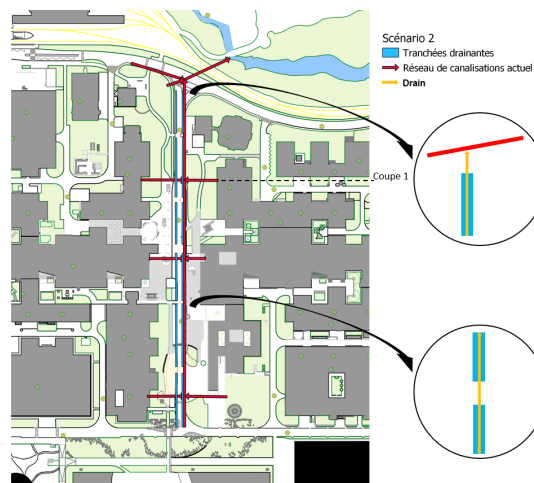


Figure 5.25: Vue en plan - Scénario 2.

Plan de façade à façade – Scénario 1
Coupe 1
Échelle : 1:250

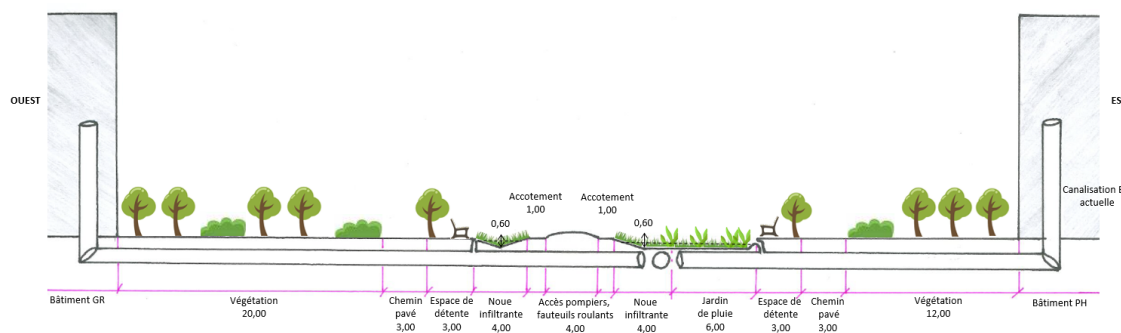


Figure 5.26: Plan de façade à façade pour le scénario 1 au niveau de la coupe 1.

Plan de façade à façade – Scénario 1

Coupe 2

Échelle : 1:175

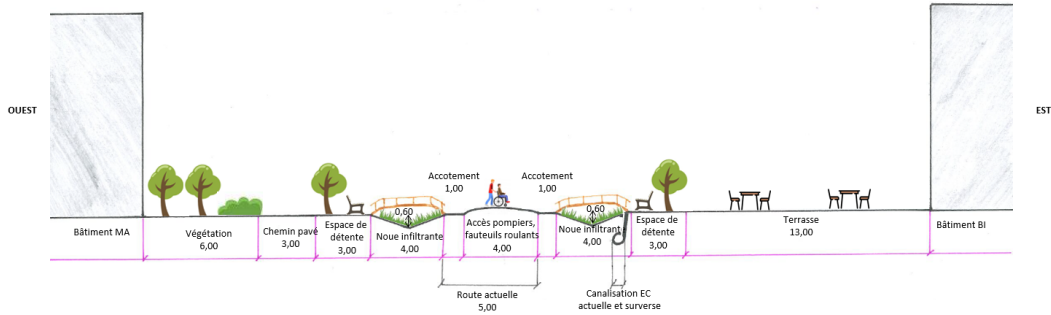


Figure 5.27: Plan de façade à façade pour le scénario 1 au niveau de la coupe 2.

Le scénario 2 est très similaire au niveau de la conception générale de l'avenue. Le principal changement est le remplacement des nœues d'infiltration par des tranchées mixtes (infiltrantes et drainantes). Celles-ci sont composées d'un matériau poreux (matériaux alvéolaires en plastique de porosité 0.9 dans ce cas), et les jardins pluviaux ne sont plus nécessaires dans ce cas car le volume de rétention est assuré entièrement par les deux tranchées. Ce scénario permet de gagner de l'espace au sol et aurait un coût moindre car il n'est pas nécessaire de mettre en place des passerelles. Il est possible de marcher sur ces tranchées, mais il est aussi possible de les arrêter sur quelques mètres aux passages stratégiques (seulement la canalisation qui draine l'eau serait continue sur toute la longueur). Ces tranchées seraient en partie infiltrantes et seraient tout de même composées d'un drain se déversant dans les canalisations existantes au nord. La figure 9.11 en annexe montre en détail une tranchée.

Plan de façade à façade – Scénario 2

Coupe 1

Échelle : 1:250

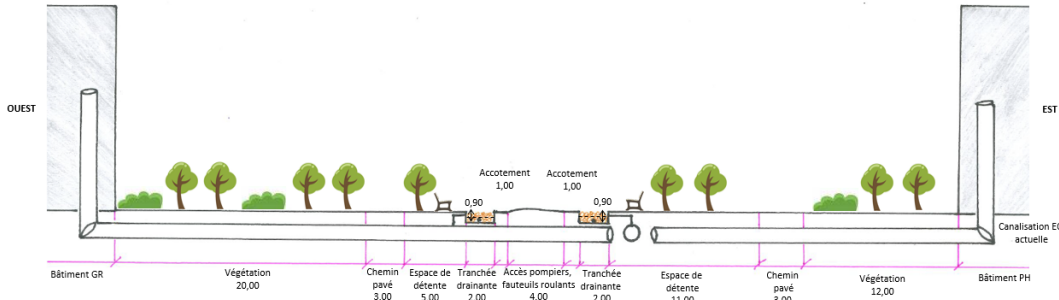


Figure 5.28: Plan de façade à façade pour le scénario 2 au niveau de la coupe 1.

Table 5.1: Dimensions des ouvrages bleus-verts installés dans la zone EST.

		Nombre	Longueur [m]	Largeur [m]	Porosité [-]	Coefficient multiplicateur selon la forme	Hauteur [m] (niveau haut Q30)	Volume total de rétention (Q30) [m ³]	Hauteur [m] (avec la re-vanche de surverse à Q100)	Volume total de rétention (Q100) [m ³]
Scénario 1	Nœues infiltrantes	2	280	4	1	0.5 (section triangulaire)	0.4	650	0.6	800
	Jardin pluvial	1	16	6	1	-	0.4		0.6	
	Jardin pluvial	1	20	6	1	-	0.4		0.6	
Scénario 2	Tranchées mixtes	2	255	2	0.9	-	0.6	550	0.9	825

De plus, comme expliqué précédemment les toitures de l'EPFL ont un fort potentiel de végétalisation car elles sont plates et revêtues de graviers. Bien que certaines parties soient recouvertes de panneaux solaires, il a été démontré les bénéfices réciproques de la combinaison entre des toitures végétalisées et des panneaux solaires. Ainsi une toiture pilote a été envisagée sur la partie du toit entre le bâtiment CM et le bâtiment CE. Cet emplacement a été choisi car le toit recouvre un couloir aéré et n'abrite pas de laboratoires ou de salles avec du matériel informatique. Cette toiture permettra de tester l'étanchéité des toits ainsi que de trouver les plantes adaptées à ce climat particulier qui peut être très humide, très venteux mais très sec parfois. Sur une surface de 680m² un substrat entre 12 et 25 centimètres pourrait être testé afin d'avoir une toiture extensive (figure 5.29). Sur une surface de 160m² ce même substrat pourrait être testé mais placé entre les rangées de panneaux solaires. Ainsi il serait possible de créer un milieu plus diversifié pour la biodiversité et améliorer le rendement des panneaux solaires. Toutefois comme la taille des toitures pilotes est minime comparée à la surface des toits du bassin versant ou de la zone de confort, son effet sur les indicateurs de gestion des eaux ou biodiversité n'est pas visible. L'analyse sur une plus petite zone ou l'installation de ce type sur une surface de toit plus vaste permettrait de voir plus précisément leurs actions sur les indicateurs. L'analyse détaillée de la structure des bâtiments devrait être faite afin de s'assurer de la possibilité d'y rajouter un certain poids. Pour les anciens bâtiments de l'EPFL (CM, CE, GR, MA, etc.) il avait été envisagé de rajouter un troisième étage. Ainsi il devrait être possible de rajouter ce poids de substrat.

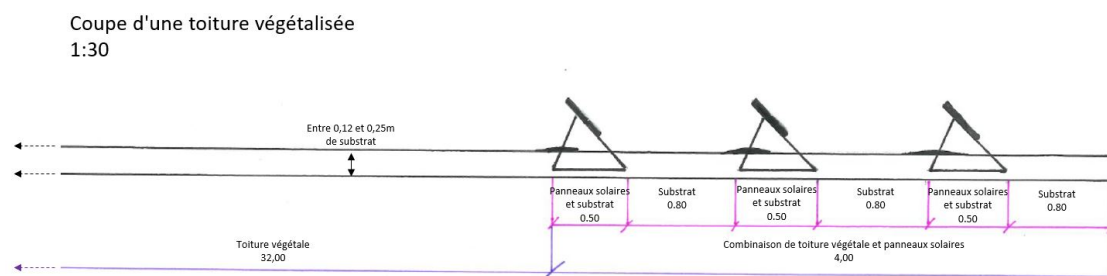


Figure 5.29: Schéma de principe d'une toiture végétalisée et d'une toiture mixte végétation et panneaux solaires.

Finalement il est intéressant de pouvoir modéliser à nouveaux ces scénarios grâce à la Matrice Bleue-Verte et de comparer les résultats des indicateurs. La figure 5.30 ci-dessous représente le diagramme en radar composé de la modélisation des indicateurs avec la situation actuelle ainsi que les deux scénarios envisagés. De manière générale les scénarios 1 et 2 ont une meilleure évaluation de leur adaptation au changement climatique. Alors que les objectifs de départ étaient centrés sur l'amélioration de la rétention et de la continuité écologique, d'autres indicateurs ont été améliorés. Ceci montre la multifonctionnalité des ouvrages. La différence entre le scénario 1 et deux sont les indicateurs B1 et C3. Le scénario 1 va favoriser une meilleure biodiversité. Ceci s'explique par le fait que les noues soient des milieux verts supplémentaires et conséquents alors que les tranchées mixtes ne sont pas des milieux verts et constituent donc une barrière pour la biodiversité. De plus, les noues permettent la création d'un nouveau type de milieu vert : les milieux humides. Bien que ça ne permet pas d'élever l'indicateur B2 à un autre niveau, les bénéfices sont tout de même conséquents. Le scénario 2 permet un gain de place et donc de mobilier urbain supérieur au scénario 1 car les tranchées drainantes ont moins d'emprise au sol. De plus, il va permettre un gain économique non exprimé ici. Ainsi, selon la volonté de l'EPFL et ses objectifs, le scénario 1 ou 2 sera choisi.

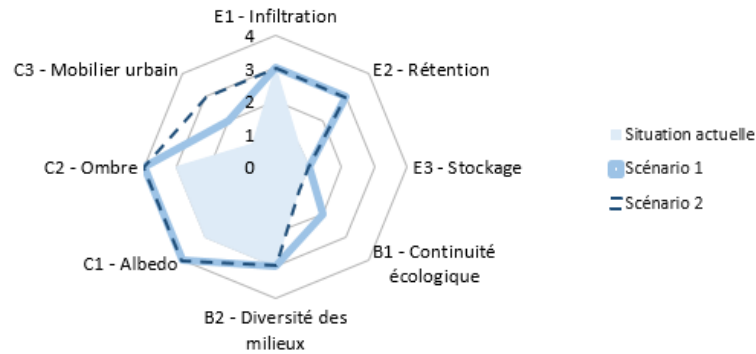


Figure 5.30: Diagramme en radar représentant les résultats de la matrice modélisée pour la situation actuelle de la zone EST ainsi que les scénarios 1 et 2 envisagés.

5.5.2 Solutions zone NORD

La modélisation de la zone NORD faite avec la matrice a aussi pu identifier des problèmes de ruissellements et plus particulièrement des problèmes réguliers d'inondation au niveau de la rue Louis Favre qui passe sous la route de la Sorge et sous le métro. En effet, non seulement la route imperméable entraîne le ruissellement de toute l'eau de pluie vers ce point bas, mais la nappe phréatique remonte aussi à cet endroit. Cependant installer des revêtements perméables ou favoriser l'infiltration dans un lieu où la nappe phréatique remonte, risque seulement d'aggraver le problème en cas de fortes pluies. Ainsi, à cet endroit il n'y a aujourd'hui pas de solutions possibles.

Le parking lui reste une très grande surface perméable, goudronnée, donc avec un grand potentiel d'amélioration. Aujourd'hui son volume de ruissellement dans le bassin versant correspondant est de 130m^3 (Q30), ce qui correspond à 20% des ruissellements de tout le bassin versant. Aussi, seulement la partie deux tiers nord du parking est comprise dans ce bassin versant. Le tiers sud se déverse dans un autre bassin versant. La limite de séparation des deux bassins versant est représentée sur la figure 5.31. Le VSA ne recommande pas l'infiltration des eaux de ruissellements provenant des parkings, cependant il est possible d'infiltrer les eaux très localement (non ruisselantes) car le site de l'EPFL est localisé sur un secteur de protection des eaux üB (pas de mesures particulières pour la protection des eaux). De plus, les indicateurs de continuité écologique et ombre étant faibles il pourrait être intéressant d'augmenter la végétation sur le parking.

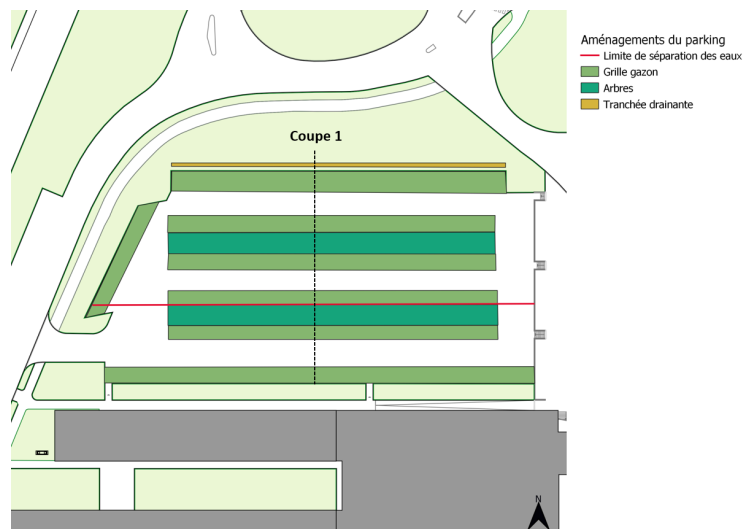


Figure 5.31: Vue en plan des aménagements sur le parking de la zone NORD.

Ainsi, comme cette zone n'est pas sujette pour le moment à un plan de réaménagement complet de la part de l'EPFL, différents niveaux d'adaptation sont proposés. La figure 5.31 montre les divers aménagements qui seront instaurés dans les différents niveaux d'adaptation. Le premier niveau d'adaptation, représenté sur la coupe de profil figure 5.32, serait composé d'une tranchée drainante installée au nord du parking. Celle-ci pourrait recueillir les eaux ruisselantes provenant du parking et les drainer jusqu'à la canalisation actuelle longeant le parking côté est. La matrice permet de modéliser un volume Q30 de 130³ et Q100 de 180m³. Ainsi en mettant en place une tranchée de 78m de longueur, 2 de largeur, 1m de profondeur et 0.9 de porosité, le volume nécessaire pour maîtriser un volume pour une crue Q30 est atteint. La revanche pour la surverse dimensionnée à Q100 rajoute 20cm de profondeur à l'ouvrage. La surverse de sécurité ainsi que le drain se vident dans les canalisations actuelles du réseau comme représenté sur les figures 9.8 et 9.7 en annexe 9.11. Ici aussi les profondeurs des canalisations des eaux claires actuelles ne sont pas connues. Cette confirmation serait nécessaire si ce projet venait à être étudié plus en détail.

Ensuite, le deuxième niveau d'adaptation représenté sur la figure 5.33 contiendrait la tranchée drainante au nord du parking, ainsi que deux allées d'arbres sur le parking. En transposant les places de parking d'un rangement en bataille vers un rangement en épi à 45°, le nombre de places de parking reste le même, et de grands espaces au sol sont libérés. Ces espaces peuvent permettre la mise en place de deux allées d'arbres entre les allées de voiture comme représenté sur la figure 5.33. Ceci augmenterait la surface ombragée, l'infiltration localement dans le sol, et améliorerait la continuité écologique. Afin d'offrir aux arbres un espace suffisant pour leur croissance, une fosse en mélange terre-pierre est envisagée. D'après [Ville de Lausanne, 2016b] elle doit faire au minimum 3 mètres de largeur à la surface du sol avant de pouvoir être recouvert d'un autre substrat moins perméable. Ici les deux allées d'arbres font 5 mètres de large ce qui laisse un espace vital acceptable à l'arbre.

Finalement, le troisième niveau d'adaptation reprend les installations du niveau 2 en ajoutant un revêtement perméable au niveau des places de parking comme représenté sur la figure 5.34. En effet, la mise en place d'un revêtement perméable de type grille-gazon, permet de renforcer la continuité écologique, et l'infiltration localement. Ce type de revêtement est souvent utilisé pour des parkings et a pour seule contrainte la difficulté de déneiger sa surface. Cependant la quantité de neige par année à Lausanne et à l'EPFL est très faible. Il neige un à deux jours maximum par hiver. De plus, ce parking ne fait pas partie des lieux déneigés par les services de l'EPFL. Lors de jours de neige seuls les accès de secours sont déneigés. Ainsi ce ne semble pas être un obstacle à l'installation de ce type de revêtement.

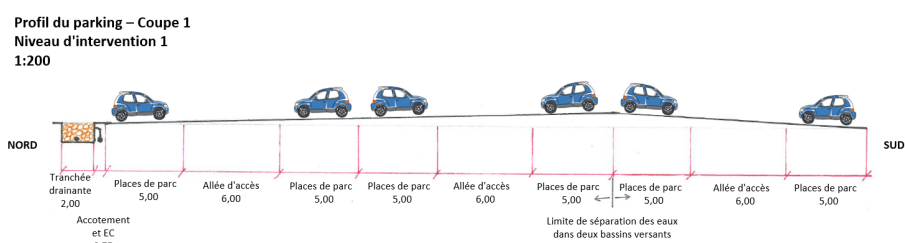


Figure 5.32: Schéma de principe du parking de la zone NORD, pour le niveau d'adaptation 1.

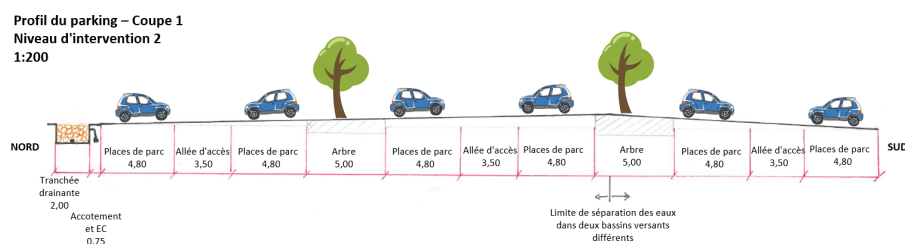


Figure 5.33: Schéma de principe du parking de la zone NORD, pour le niveau d'adaptation 2.

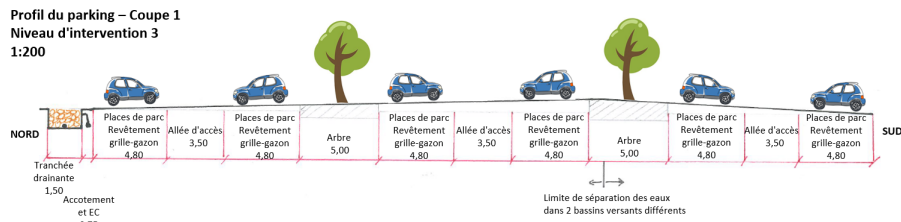


Figure 5.34: Schéma de principe du parking de la zone NORD, pour le niveau d'adaptation 3.

Si ces trois niveaux sont mis en place graduellement, à des moments différents, la tranchée drainante n'est pas obligée d'être modifiée et réduite à chaque nouveau niveau d'adaptation. Si il est décidé dès le début de réaliser le niveau d'intervention 2 ou 3, la tranchée drainante n'est pas obligée d'être aussi volumineuse. Le tableau 5.2 ci-dessous résume pour chaque niveau d'intervention les dimensions de la tranchée drainante nécessaire.

Table 5.2: Dimensions de la tranchée drainante installée dans la zone NORD en fonction du niveau d'adaptation.

	Longueur [m]	Largeur [m]	Porosité [-]	Hauteur [m] (niveau max Q30)	Volume total de rétention (Q30) [m^3]	Hauteur [m] (avec la revanche de surverse à Q100)	Volume total de rétention (Q100) [m^3]
Niveau 1	78	2	0.9	1	140	1.2	170
Niveau 2	78	2	0.9	0.8	112	1	140
Niveau 3	78	1.5	0.9	0.5	50	0.7	70

Le diagramme en radar dans la figure 5.35 ci-dessous représente le résultat de la matrice pour l'état actuel du parking et les trois niveaux d'adaptation. Les indicateurs ont été évalués sur l'espace du parking seulement et non pas la zone de confort entière. En effet il a été constaté que la matrice appliquée à toute la zone de confort n'est que très peu sensible aux changements (surtout pour les indicateurs de biodiversité et confort) car les aménagements sont réalisés sur un espace restreint. Ainsi il a été décidé d'appliquer la matrice au parking seulement. Les quatre courbes sur le diagramme en radar représentent la situation actuelle et les trois niveaux d'adaptation. De manière générale il est clair que les aménagements dans les trois niveaux d'adaptation améliorent la majorité des indicateurs. De plus, au fur et à mesure que les niveaux d'adaptation augmentent, les indicateurs ont une meilleure note, notamment visible grâce aux aires des polygones qui augmentent. A chaque niveau la tranchée est dimensionnée pour assurer 100% d'infiltration alors l'indicateur E2 est toujours au maximum. L'infiltration, la continuité écologique, la diversité des milieux ainsi que l'albedo augmentent graduellement avec le niveau d'adaptation. Les indicateurs E3 et C3 n'augmentent pas car aucun aménagement n'a été réalisé pour les améliorer. Finalement l'indicateur C2 n'évolue pas malgré que des arbres soient rajoutés sur le parking. Ceux-ci ont une surface trop faible comparé à la surface totale du parking.

En parallèle de ces aménagements envisagés au niveau du parking, il a été réfléchi de mettre en place un autre bassin de rétention à la sortie du bassin versant. En effet une majorité des eaux du bassin versant passent par un même point de rencontre, au nord-ouest du bâtiment BP, où aujourd'hui un espace de végétation non exploité est présent. Représenté sur la figure 5.36, le bassin versant ferait $400m^2$ de surface et 1 mètre de profondeur pour pouvoir potentiellement maîtriser les $400m^3$ de ruissellement provenant du bassin versant (dimensionné avec Q30 et ayant pris en compte le volume de rétention maîtrisé au niveau du parking par les aménagements décrits ci-dessus). Une revanche de 50 centimètres a été dimensionnée dans le cas d'un débordement jusqu'à un Q100. Le bassin de rétention atteindrait ainsi un volume de $600m^3$. Toutefois, comme expliqué précédemment, la côte des canalisations dans le sol n'est pas connue. Ainsi il est difficile de dire si

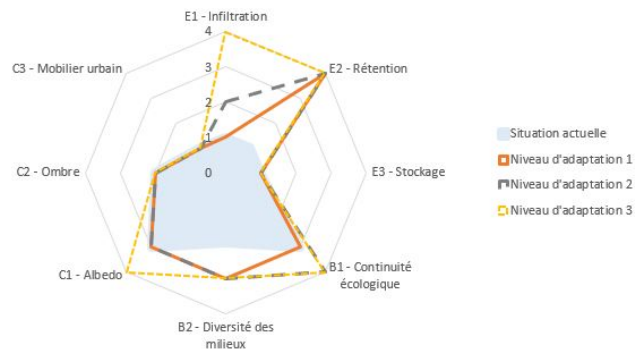


Figure 5.35: Diagramme en radar représentant les résultats de la matrice modélisés sur le parking de la zone NORD seulement, pour la situation actuelle ainsi que les trois niveaux d'adaptation envisagés.

l'entrée d'eau dans le bassin sera assez haute par rapport à la profondeur du bassin de rétention, ainsi que par rapport à la conduite de sortie du bassin. Ce bassin à ciel ouvert permettrait la création d'un nouveau milieu (un milieu humide) et donc l'apport de biodiversité avec des herbes adaptées à un alternance de périodes de sécheresse et d'inondation. Pouvant potentiellement attirer les moustiques, son emplacement excentré des zones de fortes affluences du campus lui permet de ne pas gêner les usagers du campus.



Figure 5.36: Scénario proposé - bassin de rétention.

5.5.3 Solutions zone SUD

La zone sud est particulière au sein de l'EPFL car elle n'abrite pas de salles de cours, amphithéâtres, laboratoires ou cafétérias. C'est une zone plus ouverte qui invite au repos avec une architecture toute particulière composée du Rolex Learning Center (RLC) et du ArtLab. Cette zone a été récemment refaite, ainsi il est intéressant d'en étudier les résultats des indicateurs. Pour cette même raison, il a été difficile d'émettre de potentiels modifications et aménagements car une partie des espaces verts de cette zone ont été désignés spécifiquement par le laboratoire ALICE de l'EPFL.

Les résultats de la matrice appliquée à l'état actuel de la zone montrent que la gestion de l'eau n'y est pas optimale. Cette zone comporte beaucoup de végétation et notamment des arbres récemment plantés dans le cadre de la campagne "50 arbres pour les 50 ans de l'EPFL". Ils nécessitent l'apport d'eau par des camions citernes en été, paradoxalement avec le fait que le ruissellement est important dans cette zone. Alors que cette place est récente, des jardins ont été créés, aucun élément de rétention naturel n'a été mis en place, la gestion de l'eau n'a pas été incluse dans le projet.

En aval de la pente venant depuis l'esplanade il pourrait être intéressant de mettre en place un ouvrage de rétention afin de limiter les 50m³ de ruissellements (dimensionnés à Q30) pouvant potentiellement inonder la route en contrebas. Comme représenté sur la figure 5.42, un jardin pluvial a été désigné en aval de la zone de ruissellement. Avec une surface de 200m² et une profondeur de 0.25m, il permet de contenir les 50m³ de ruissellements. En rajoutant 0.1m de profondeur le volume atteint 70m³, soit le volume dimensionné à Q100 pour la revanche de sécurité. Les figures 5.37, 5.38 et 5.39 montrent les coupes 1, 2 et 3 du jardin pluvial réalisées aux positions affichées sur la figure 5.42. La figure 5.40 montre la forme de ce jardin de pluie vue de haut en perspective. La plateforme cartographique de la Confédération suisse (map.geo.admin.ch) a permis de visualiser le dénivelé présent à cet endroit. Ainsi, sur la coupe 1 (figure 5.37) il est possible de voir un muret de 25cm, puis sur la coupe 2 (figure 5.38) ce même muret de 50 centimètres de hauteur. En effet afin de délimiter l'emprise du jardin pluvial et soutenir le terrain en amont après excavation d'une partie du terrain un muret sera installé le long des côtés ouest et nord du jardin. La coupe 3 (figure 5.39) montre le muret côté nord conçu en pente descendante de 50 centimètre à 0 centimètre afin de suivre le dénivelé du terrain. Côté est et sud, un talus permet de délimiter le jardin pluvial et protéger la route en aval de possibles inondations. Dû à l'alternance de sécheresses et inondations, ce jardin doit être composé de plantes palustres donc adaptées aux sols humides et marais, indigènes et diversifiées. Une image de référence présentant la composition du substrat infiltrant du jardin pluvial est visible dans la figure 5.41, ainsi que le talus de protection. La hauteur de sol fait référence à la hauteur de la route à l'est et au sud, le niveau haut et la surverse de sécurité ont été dimensionné pour un Q30 et un Q100 respectivement. Le jardin pluvial apportera de la fraîcheur, une autre diversité de plantes et visuellement un espace paysagé différent, en relief et coloré.

Schéma de principe du jardin pluvial – Coupe 1
1:120

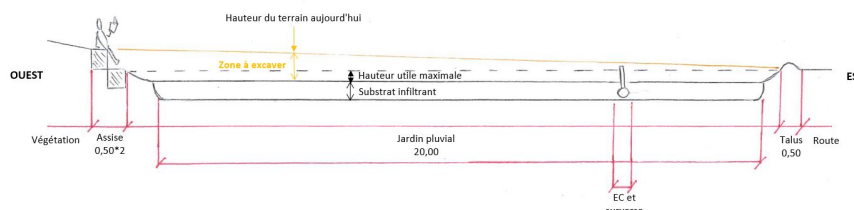


Figure 5.37: Plan du profil du jardin pluvial de la zone SUD, au niveau de la coupe 1.

Schéma de principe du jardin pluvial – Coupe 2
1:120

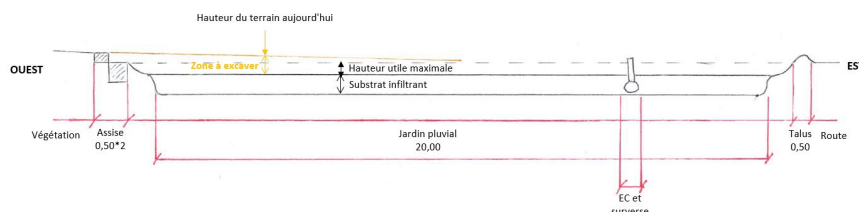


Figure 5.38: Plan du profil du jardin pluvial de la zone SUD, au niveau de la coupe 2.

Schéma de principe du jardin pluvial – Coupe 3
1:120

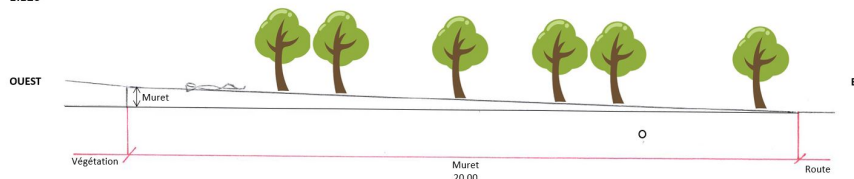


Figure 5.39: Plan du profil du jardin pluvial de la zone SUD, au niveau de la coupe 3.

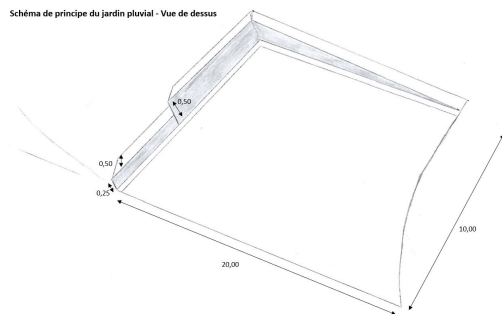


Figure 5.40: Schéma de principe du jardin pluvial

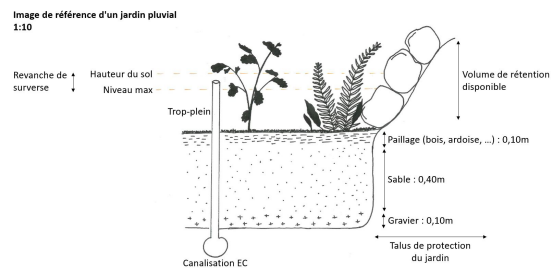


Figure 5.41: Image de référence du jardin pluvial

La matrice permet d'identifier d'autres besoins en rétention afin de gérer les ruissellements en aval du bassin versant. Il pourrait être envisagé de mettre en place un bassin de rétention au sud de la zone d'étude entre le RLC et la route cantonale, afin de décharger le réseau en aval. Cependant la canalisation qui récupère les eaux de pluies à cet endroit va se jeter directement dans le lac par la suite. Ainsi il n'est pas forcément optimal de créer un bassin de rétention quelques mètres en amont du lac Léman, étant lui-même un volume de rétention très conséquent. Aussi, une gestion plus globale des ruissellements avec les autres communes et les autres indicateurs permettraient une optimisation du système. Par exemple un projet avec la commune de St-Sulpice en contrebas pourrait permettre d'installer des ouvrages multifonctionnels qui profiteraient à eux et au campus en termes de gestion du ruissellement et de biodiversité : ouvrages qui dirigeraient les eaux de ruissellement en surface vers le lac (noues par exemple).

Les résultats du sondage montrent un réel manque d'ombre dans cette zone, que ce soit dans l'analyse de la qualité des ouvrages ou dans les questions ouvertes du sondage. Au vu des grands espaces de végétation dans cette zone, il semble facile d'imaginer une surface de canopée importante. Tout d'abord une première surface de canopée sur la prairie entre l'esplanade et le jardin pluvial envisagé permettrait aux étudiants souvent nombreux à midi à cet endroit de trouver de l'ombre (figure 5.42). De plus, avec son muret et sa végétation, le jardin pluvial attirerait plus d'usagers dans ce nouvel espace, et donc ce serait un endroit propice à l'ajout d'ombre. Aussi, un nouvel espace composé de barbecues a été aménagé au sud-ouest du RLC. Cependant peu de tables et surtout d'arbres n'invitent à s'y reposer. Ce pourrait être une nouvelle place de pique-nique agréable et équipée qui aurait parallèlement un effet positif sur l'indicateur de mobilier urbain (figure 5.43). Ces deux espaces de canopée envisagés (600m² et 1500m² respectivement) apporteraient non seulement de l'ombre mais aussi de la diversité dans les milieux verts et potentiellement garantir une meilleure infiltration grâce à leurs racines.

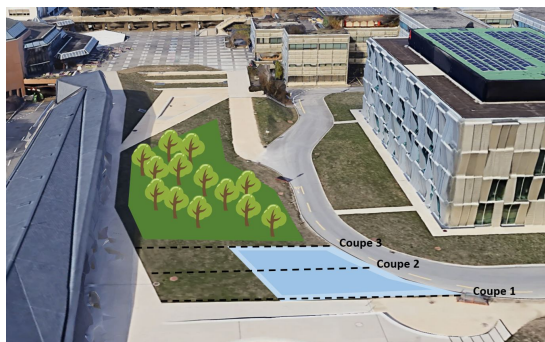


Figure 5.42: Scénario proposé - jardin pluvial et zone boisée.



Figure 5.43: Scénario proposé - zone boisée et mobilier urbain.

Au niveau de la matrice, ces aménagements (jardin pluvial et nouveaux espaces boisés) permettent d'améliorer l'indicateur d'ombre et de mobilier urbain comme visible sur la figure 5.44. Cette zone étant très étendue et le jardin pluvial n'étant dimensionné que pour la maîtrise d'une petite partie des ruissellements les autres indicateurs ne s'améliorent pas même si les valeurs de certains augmentent. Par exemple l'indicateur de rétention passe de 0% à 3%, cependant la limite avec le niveau d'adaptation supérieur est à 25%.

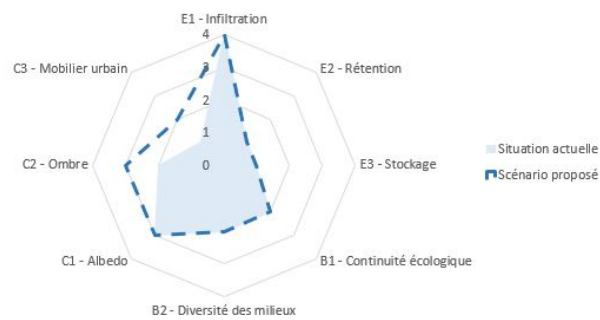


Figure 5.44: Diagramme en radar représentant la situation actuelle de la zone SUD et la situation projetée avec les nouveaux aménagements.

6. Discussion

6.1 Qualités de la Matrice Bleue-Verte

L'application de l'outil au cas pilote a permis de montrer que la Matrice Bleue-Verte élaborée permet d'obtenir un résultat rapide, avec peu de paramètres et des données relativement faciles à obtenir de la part des communes. Un résultat précis permet quant à lui de mettre en avant les indicateurs qui peuvent être améliorés et avec quelle ampleur pour pouvoir mettre en place des solutions. Ainsi les solutions répondent à un réel besoin et sont proportionnées et adaptées à ce besoin. Bien que conçue dans un premier temps pour adapter les quartiers déjà existants, l'étude de cas a pu montrer qu'il est possible de modéliser des scénarios et donc modéliser des futurs quartiers entièrement planifiés.

L'atout majeur de cette matrice est sa vision holistique, son approche pluridisciplinaire. Son évaluation ne se focalise pas seulement sur la résilience en termes de gestion des eaux et de biodiversité, mais ajoute un caractère réaliste en prenant en compte le confort urbain et en gardant comme but l'habitabilité de la ville, sa praticité et son confort pour les riverains.

La revue littéraire réalisée sur les solutions bleues-vertes existantes avait déjà permis dans un premier temps de relever la multifonctionnalité des ouvrages. Grâce à l'étude des diagrammes en radar (notamment celui comparant les différents scénarios de la zone EST), la Matrice Bleue-Verte a pu témoigner de cette multifonctionnalité. En effet bien que dans ce cas un seul type ouvrage soit mis en place (des noues), et une seule mesure soit visée en premier lieu, plusieurs indicateurs évoluent positivement en termes d'adaptation. Il se peut que des changements d'aménagements apportent un aspect bénéfique à un indicateur mais plus négatif à un autre. Par exemple, un revêtement en gravier favoriserait l'albedo par rapport à un revêtement en végétation, mais serait défavorable vis-à-vis de l'évapotranspiration ou de la continuité écologique. La figure 6.1 montre la variation du pourcentage d'adaptation de certains indicateurs en fonction du revêtement.

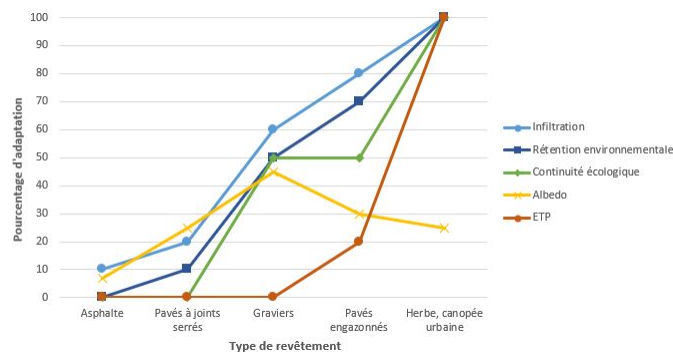


Figure 6.1: Pourcentage d'adaptation (100% = totalement adapté) en fonction du type de revêtement pour chaque indicateur.

Ainsi, cette matrice peut être utilisée pour aider les communes ou collectivités à mettre en place leur Plan Climat par exemple. Dans ces derniers, les villes émettent leurs objectifs en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation de leur commune aux effets du changement climatique. Des certifications peuvent aussi être obtenues. Le comité technique ISO/TC 268 "Aménagement durable des villes et des collectivités" a publié la norme ISO 37101 "Développement durable au sein des collectivités territoriales - Système de management pour le développement durable." qui énonce les bases du développement durable adapté aux communautés territoriales. Celle-ci incite les villes à augmenter leur capacité de réaction face aux catastrophes naturelles et aux effets du changement climatique, mais aussi à créer un lieu de vie plus sain, plus heureux et plus durable [Organisation internationale de normalisation, 2016] [Cerema, 2016].

6.2 Potentiels d'amélioration de la Matrice Bleue-Verte

Au cours de l'étude du cas pilote, plusieurs potentiels d'amélioration ont été décelés à plusieurs niveaux. Bien que la question de l'échelle soit une question prédominante depuis le début du projet, elle pose aujourd'hui encore des questions. Le cas d'application de la zone NORD du campus EPFL a permis de montrer que la Matrice Bleue-Verte n'est pas sensible aux aménagements réalisés sur des espaces restreints de la zone d'étude. Ainsi il est intéressant de se demander si le nombre de niveaux d'adaptation est suffisant ou non. Ajouter des niveaux permettrait d'avoir une matrice plus sensible aux petits aménagements. Cependant, trop de niveaux d'adaptation leur feraient perdre leur sens. Cette réflexion rejoint celle concernant la question de la taille de la zone d'étude réellement adaptée à cette matrice. En effet, la sensibilité de la matrice dépend aussi de la taille de la zone d'étude. L'analyse a permis de constater que l'échelle idéale est l'échelle humaine, celle ressentie à un endroit précis pour certains indicateurs. Par exemple l'albedo est une sensation très locale, la gestion de l'infiltration se fait aussi localement, là où l'eau tombe. Ainsi la portée de la matrice serait la taille d'un îlot. De plus, le choix des zones d'étude a été fait en prenant des paramètres qualitatifs et non quantitatifs, bien que des études sur les effets d'îlots de chaleur à l'EPFL aient déjà été faites. Cependant cette méthodologie a pour but d'être appliquée par la suite à d'autres cas pilote pour lesquels il est peu probable que beaucoup d'études du même style aient déjà été faites.

Un point clé de cette méthodologie a aussi été la mise en place des niveaux d'adaptation des indicateurs. Il est important de ne pas faire dire aux indicateurs ce qui est arrangeant. Ainsi, ceux-ci doivent être définis de manière mesurée, précise et consistante d'un indicateur à un autre. Les indicateurs d'infiltration et de continuité écologique sont comparés à un état optimal théorique en termes de maîtrise des événements extrêmes tout en conciliant une ville habitable. Ainsi cet état d'adaptation élevé n'est pas évident à mettre en place. Pour l'infiltration un revêtement conciliant efficacité et praticité a dû être trouvé pour chaque type d'affectation de parcelle. Toutefois c'est aussi lors de la planification d'une solution qu'une réflexion doit être faite avec une approche plus globale en regardant de manière générale si la solution proposée est cohérente avec des paramètres externes à ce projet. Par exemple vérifier la présence d'une voie d'accès praticable pour les personnes à mobilité réduite, la structure des bâtiments et leur étanchéité lors de la mise en place de toitures végétales, l'état du sous-sol composé déjà de nombreuses installations humaines (canalisations, salles en sous-sol, etc.), ou encore les installations à la surface qui peuvent être fragilisées par des modifications du sous-sol (lignes de métro, train, etc.). Ainsi la Matrice Bleue-Verte fait un premier état des lieux de la situation actuelle mais des réflexions inhérentes aux installations et à la planification globale du quartier doivent être faites.

La notion de ville bleue-verte incite à mettre en place des ouvrages de gestion naturelle des eaux. Or une ville qui maîtriserait totalement le risque d'inondation à l'aide de bassins de rétention souterrains et d'importantes canalisations aurait un indicateur élevé de rétention avec la Matrice Bleue-Verte. Ce qui est un peu paradoxal. Dans ce projet la mise en place de rétention environnementale est simplement recommandée fortement au moment de la mise en place de solutions. Il serait intéressant de pouvoir mesurer différemment une ville bien adaptée avec des ouvrages naturels et une tout aussi bien adaptée avec des ouvrages artificiels. Cependant il est difficilement envisageable de demander à une ville qui maîtrise déjà bien le risque inondation avec un système artificiel de totalement le modifier en un système naturel. Ainsi en parallèle de cet indicateur de rétention qui résout la problématique du ruissellement, un autre indicateur devrait être ajouté pour quantifier la naturalité du système : à quelle distance de l'état optimal est le système ? Un résultat modélisé par la matrice devra alors concilier ces deux indicateurs.

Différents indicateurs ont aussi des potentiels d'amélioration au niveau de leur quantification.

Afin de prendre en compte l'avis de la population, l'indicateur de mobilier urbain a été basé sur un sondage réalisé auprès des riverains. Celui-ci permet de décrire l'état actuel de la situation,

mais il ne permet pas de connaître la valeur de l'indicateur pour les solutions proposées. Faire un sondage auprès de la population avec les solutions proposées semble peu réaliste. Ainsi il a été déterminé d'augmenter de 1 le niveau d'adaptation de l'indicateur lorsque des aménagements en sa faveur ont été mis en place. De plus, le niveau d'adaptation de cet indicateur s'obtient sur la base d'une moyenne faite des pourcentages pour chaque catégorie de mobilier. Ainsi, si peu de variété de mobilier est présent mais que ceux présents sont suffisants, l'indicateur sera quand même faible. Cet indicateur étant subjectif, il est difficile de le quantifier et de l'analyser correctement. Ce qui est intéressant ce sont les remarques apportées par les riverains dans la question ouverte. Une solution serait de modifier le sondage en posant une première question qui demanderait si chaque type de mobilier est opportun ou non dans cette zone d'étude. Cette question remplacerait la question sur la nécessité. Puis viendrait la deuxième question actuellement sur la quantité suffisante ou insuffisante de chaque type de mobilier. Il serait alors plus aisé d'évaluer les réponses à la deuxième question sur la base du mobilier opportun de la première question.

L'indicateur de stockage des eaux ne semble aujourd'hui pas encore complètement abouti malgré les nombreuses réflexions qu'il a apporté. En effet, actuellement il mesure le stockage nécessaire pour assouvir le besoin des plantes en eau. Toutefois aujourd'hui sur le campus, aucun espace vert n'est arrosé par l'Homme. Ainsi il est intéressant de se demander si les plantes ont suffisamment d'eau dans cette situation ou si aujourd'hui elles manquent réellement d'eau. De plus il est difficile de déterminer si avec les prévisions de températures en 2050 les plantes pourront toujours vivre seulement avec l'apport d'eau des précipitations ou si elles auront besoin d'eau apportée par l'Homme. Il faudrait alors faire une analyse plus détaillée du réel besoin des plantes en eau. Une autre méthodologie consisterait à compenser seulement l'eau potable qui est utilisée pour arroser les plantes par de l'eau de pluie récupérée et stockée. Dans ce cas il faudrait connaître cette consommation exacte, qui n'est pas le cas sur le campus EPFL. De plus, dans le cas précis de l'EPFL et des communes autour du lac Léman il peut sembler étonnant de vouloir créer des cuves de stockage artificielles avec la ressource en eau que procure le lac Léman. Ainsi cette méthodologie peut être plus adaptée pour des communes avec un stress hydrique important, où la ressource en eau est limitée. La dernière réflexion serait de stocker l'eau de pluie pour l'utiliser dans les sanitaires. Cette démarche nécessite des travaux conséquents de renouvellement des canalisations donc elle n'a pas été prise en compte dans ce projet, mais ce pourrait être une option à ajouter dans la matrice pour les communes intéressées à mettre en place ce système. Elle aurait alors besoin de connaître le dimensionnement de la cuve de stockage nécessaire.

De plus, la rétention des eaux est liée au stockage. La modélisation réalisée dans ce projet ne soustrait pas l'eau stockée dans les cuves de récupération d'eau de pluie de l'eau ruisselante. Une amélioration à faire serait donc de prendre en compte négativement le volume d'eau stockée dans le dimensionnement du ruissellement des eaux pluviales.

Finalement, dans ce projet le coût des solutions n'a pas été déterminé. Le coût de la mise en place de ce type d'ouvrages dépend de l'origine du projet. Si un tel projet est réalisé dans le cas d'une planification urbaine, comme par exemple pour le cas de l'avenue Piccard, le coût sera moindre. Dans ce cas, installer des ouvrages de type bleus-verts sont peu coûteux. Par contre, si des ouvrages bleus-verts doivent être installés pour réduire un risque, alors le projet vaudra plus.

6.3 Gestion du risque

Ce projet a comme but initial de maîtriser les risques c'est-à-dire le risque théorique, initial, avant toutes prises de mesure. Toutefois, à la fin du projet la nécessité de rajouter un axe de gestion du risque est apparue. En effet, la gestion du risque résiduel n'est pas réalisée. Le risque résiduel correspond au risque qui subsiste une fois que tous les dispositifs de maîtrise ont été mis en place. Ainsi, la présence d'un risque résiduel indique un besoin toujours présent [Office Fédérale de la Protection de la Population, 2013] [Etat de Vaud, 2020a]. Pour la gestion de l'eau de pluie, cette caractéristique se traduit par le fait que le projet maîtrise les ruisselle-

ments localement, là où l'eau tombe. Donc le système peut être dépassé par les événements mais il reste robuste. Le nouvel objectif serait d'avoir une approche globale de la gestion des eaux, étudier plus particulièrement où va l'eau en aval, et gérer le système même lorsqu'il est dépassé. Donc avoir une topographie du terrain et modéliser les ruissellements grâce à des logiciels est une étape supérieure. Pour cette raison, il paraît nécessaire de rajouter un indicateur afin de gérer ce risque résiduel.

7. Conclusions

Aujourd'hui une première itération de la méthodologie a été réalisée. Une revue littéraire a mis en évidence les problématiques actuelles des villes et les indicateurs pertinents pour évaluer leur adaptation face au changement climatique. Leurs quantifications et qualifications ont permis de mettre en place la Matrice Bleue-Verte ainsi qu'une limite pour chaque indicateur et chaque niveau d'adaptation. Pour mettre en place une méthodologie comme celle-ci, un diagnostic d'un cas d'étude est nécessaire pour d'une part la tester, puis analyser ses points forts et ses potentiels améliorations. Ainsi il pourrait être intéressant de réaliser une deuxième itération en prenant en compte ces potentiels d'amélioration afin d'appliquer la matrice à un nouveau cas pilote. Néanmoins grâce au premier cas pilote, la Matrice-Bleue-Verte permet déjà d'offrir un diagnostic précis d'une zone d'étude.

Ainsi la Matrice Bleue-Verte est une méthodologie simple, rapide et précise pour quantifier et qualifier le niveau d'adaptation des villes au changement climatique. En insérant les paramètres d'entrée (faciles à obtenir pour toute commune étudiée) dans la matrice, celle-ci modélise un niveau d'adaptation au changement climatique pour chaque indicateur. En contournant les modèles mathématiques complexes, cette méthodologie offre un diagnostic tout de même précis et analysable rapidement. La création d'un catalogue de solutions possibles à mettre en place est une réelle continuité à cette méthodologie. Il permet d'apporter des pistes d'aménagements concrets, réalisables selon les objectifs à atteindre, eux-mêmes déterminés par le diagnostic initialement réalisé.

De part son caractère d'outil d'aide à la décision, la Matrice Bleue-Verte répond à un réel besoin des communes en termes d'adaptation au changement climatique. En effet, après la discussion avec des services de la ville de Lausanne, les aménagements ne sont pas forcément mis en place après la réalisation d'un diagnostic mais plutôt là où il y a des opportunités. Ainsi, pour réellement adapter les villes au changement climatique et avoir une approche plus durable, il faudrait évoluer d'une réflexion "daily business" donc quotidienne à une réflexion plus au long terme en prenant en compte par avance les risques possibles. De plus, cette méthodologie offrirait une approche plus globale aux villes et communes dont les différents services mettent en place des aménagements chacun de leur côté.

8. Remerciements

Je voudrais remercier Sabine Chamoun, Khalid Essyad et Giovanni De Cesare pour leur aide constante durant tout le projet ainsi que leurs précieux conseils et informations. Merci à Gianluca et le service Durabilité EPFL pour toutes les connaissances et aides que vous m'avez apportées.

Je suis particulièrement reconnaissante à tous les expert.e.s et professionnel.le.s que j'ai rencontré au cours de ce projet : Dasaraden Mauree, Franco Vigliotti et Pierre Gerster, Nathalie Baumann, Nicole Christe, Anne Roches, Magali Henry, Michaël Rosselet et Dominique Zürcher.

Finalement, je voudrais aussi remercier Vincent Dehail, Yoann Le Goaziou et toute l'équipe de BG Ingénieurs Conseils qui m'ont donné l'opportunité de réaliser ce projet entouré d'une superbe équipe, ainsi que la section Sciences et Ingénierie de l'environnement de l'EPFL pour leur accord envers la réalisation de cette thèse de master.

9. Annexes

9.1 Les indicateurs et leurs niveaux d'adaptation

Indicateur E1 - Infiltration			
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ELEVE
$Ci\ moyen \leq 0.25 * Ci\ optimal$	$0.25 * Ci\ optimal < Ci\ moyen \leq 0.5 * Ci\ optimal$	$0.5 * Ci\ optimal < Ci\ moyen \leq 0.75 * Ci\ optimal$	$0.75 * Ci\ optimal < Ci\ moyen$

Indicateur E2 - Rétention			
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ELEVE
$Vactuel \leq 0.25 * Voptimal$	$0.25 * Voptimal < Vactuel \leq 0.5 * Voptimal$	$0.5 * Voptimal < Vactuel \leq 0.75 * Voptimal$	$0.75 * Voptimal < Vactuel$

Indicateur E3 - Stockage en eau			
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ELEVE
$Vactuel \leq 0.25 * Voptimal$	$0.25 * Voptimal < Vactuel \leq 0.5 * Voptimal$	$0.5 * Voptimal < Vactuel \leq 0.75 * Voptimal$	$0.75 * Voptimal < Vactuel$

Indicateur B1 - Continuité écologique			
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ELEVE
$PCactuelle \leq 0.25 * Pcoptimale$	$0.25 * Pcoptimale < PCactuelle \leq 0.5 * Pcoptimale$	$0.5 * Pcoptimale < PCactuelle \leq 0.75 * Pcoptimale$	$0.75 * Pcoptimale < PCactuelle$

Indicateur : B2 - Diversité des milieux favorables			
Nombre de milieux représentés	Entre 0 et 2 Entre 3 et 5 Entre 6 et 8	Diversité de shannon H'	
		H' < 50%ln(N)	H' > 50%ln(N)
		TRES FAIBLE	FAIBLE
FAIBLE	MOYEN		
MOYEN	ELEVE		

Indicateur C1 - Albedo			
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ELEVE
$0 \leq \alpha \leq 0.1$ et $0.9 < \alpha \leq 1$	$0.1 < \alpha \leq 0.2$ et $0.8 < \alpha \leq 0.9$	$0.2 < \alpha \leq 0.3$	$0.3 < \alpha \leq 0.8$

Indicateur C2 - Ombre			
TRES FAIBLE	FAIBLE	MOYEN	ELEVE
0 - 12.5% et 87.5 - 100%	12.5 - 25% et 75 - 87.5%	25 - 37.5% et 62.5 - 75%	37.5 - 62.5%

Indicateur C3 - Mobilier urbain			
Quantité	Absent Insuffisant Suffisant	Qualité	
		Insuffisamment ombragés	Suffisamment ombragés
		TRES FAIBLE	FAIBLE
FAIBLE	MOYEN		
MOYEN	ELEVE		

Figure 9.1: Les limites des niveaux d'adaptation de chaque indicateur.

9.2 Guide d'utilisation de la Matrice Bleue-Verte

Adaptation des villes au changement climatique

Guide d'utilisation de la Matrice Bleue-Verte

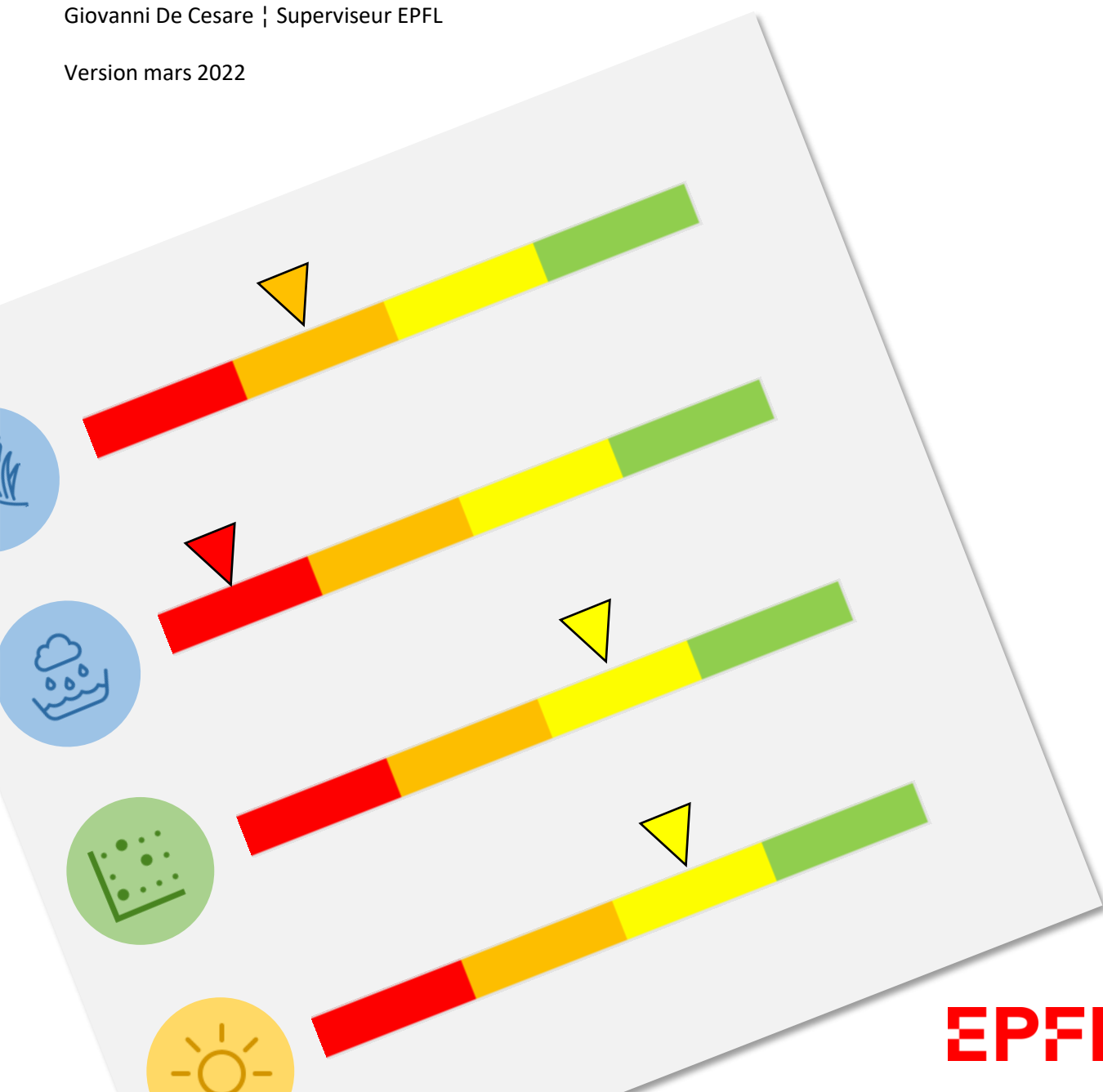
Loé Maire | **Projet de master EPFL**

Sabine Chamoun | Superviseure BG Ingénieurs Conseils

Khalid Essyad | Superviseur BG Ingénieurs Conseils

Giovanni De Cesare | Superviseur EPFL

Version mars 2022



PRESENTATION GENERALE

La Matrice Bleue-Verte a été conçue sur l'outil de travail excel.

(1) Le fichier est composé de nombreux onglets traduisant les étapes de l'analyse et un dernier onglet appelé "Matrice-Bleue-Verte" donnant le résultat final de la matrice pour chaque indicateur.

(2) Chacune des pages est composée d'un titre expliquant ce à quoi elle réfère, et mentionne la commune à laquelle elle fait référence ainsi que la zone d'étude plus spécifique.


(2)

BG GESTION DES EAUX DE PLUIE - Introduction


Commune :	EPFL
Zone :	SUD

1. Plan de la situation

Délimitations de la zone d'étude



Bassin versant de la zone d'étude



2. Objectifs du présent document

Ce formulaire est conçu dans le cadre d'un projet de quantification de l'adaptation des villes au changement climatique.

Deux problématiques principales sont analysées :

- les risques d'inondations en cas de fortes pluies (analyse de l'infiltration des eaux pluviales, de la nécessité de bassins de rétention et dimensionnement des ouvrages le cas échéant),
- la rarefaction de l'eau (quantification du stockage en eau nécessaire).

L'analyse est réalisée pour la période estivale (juin, juillet, août). La pluie de projet utilisée pour analyser les risques d'inondations est une pluie d'été courte mais intense, détaillée dans la partie 3 ci-dessous. Le besoin en stockage d'eau est dimensionné avec la moyenne des pluies en 2050.

Pour plus de détails veuillez vous référer à la méthodologie "Matrice Bleue-Verte".

Introduction Surfaces Infiltration Canalisations Volume de rétention théorique Volume de rétention actuel Stockage Matrice Bleue-Vert ...

(1)

Ce présent document passera en revue chaque onglet afin d'expliquer comment utiliser la matrice, expliquer les résultats qui en ressortent, les unités, les données utilisées, ...

Pour toutes questions supplémentaires, veuillez-vous adresser à Loé Maire : loe.maire@epfl.ch

INTRODUCTION

La page d'introduction est composée de la même façon pour chaque thématique.

Le plan de la situation permet d'énoncer clairement la délimitation de la zone d'étude en termes d'habitabilité, et le bassin versant correspondant à cette zone.

1. Plan de la situation

Délimitations de la zone d'étude



Bassin versant de la zone d'étude



2. Objectifs du présent document

Ce formulaire est conçu dans le cadre d'un projet de quantification de l'adaptation des villes au changement climatique.

Deux problématiques principales sont analysées :

- les risques d'inondations en cas de fortes pluies (analyse de l'infiltration des eaux pluviales, de la nécessité d'ouvrages de rétention et leur dimensionnement le cas échéant),
- la rarefaction de l'eau (quantification du stockage en eau nécessaire).

L'analyse est réalisée pour la période estivale (juin, juillet, août). La pluie de projet utilisée pour dimensionner les ouvrages de rétention a un temps de retour de 30ans. Le débit de fuite maximum utilisé fait référence à la valeur requise par la ville de Lausanne. Le besoin en stockage d'eau est dimensionné avec la moyenne des pluies en 2050.

Pour plus de détails veuillez vous référer au "Guide d'utilisation de la Matrice Bleue-Verte".

De plus, les objectifs de cette partie sont énoncés pour expliquer en quelques mots les problématiques, les indicateurs utilisés et les potentielles hypothèses.

INFILTRATION

Le calcul du coefficient de ruissellement actuel moyen est réalisé de la façon suivante :

- (1) Insérez l'aire de chaque type de **surface**.
- (2) La **surface réduite** se calculera automatiquement à l'aide des coefficients de ruissellements Cr.
- (3) Le **coefficient de ruissellement actuel** moyen CR_actuel est calculé à l'aide de la surface totale et de la surface réduite totale.

4. Calcul du coefficient de ruissellement acutuel de la parcelle (Cr actuel)

Données de base	Surface de la parcelle	0 [m²]		
Type de surface		Cr [-]	Surface [m²]	Surface réduite [m² _{red}]
Toit incliné, tuile, tôle, verre, fibrociment		0.95	0	0.00
Toit plat recouvert de graviers		0.6	0	0.00
Toit plat végétalisé	Epaisseur du substrat >50cm (intensive)	0.1	0	0.00
	Epaisseur du substrat 25-50cm (semi-intensive)	0.2	0	0.00
	Epaisseur du substrat 10-25cm (extensive)	0.4	0	0.00
	Epaisseur du substrat <10cm	0.7	0	0.00
Route, place et chemin	Revêtement asphalté, béton	0.9	0	0.00
	Revêtement pavés à joints serrés	0.8	0	0.00
	Revêtement graveleux	0.6	0	0.00
	Revêtements pavés à joints écartés	0.5	0	0.00
	Revêtement graviers	0.4	0	0.00
	Revêtement grilles-gazon, pavés-gazon	0.2	0	0.00
Surface verte, jardin, pré, ...	Pente <10%	0.1	0	0.00
	Pente 10-30%	0.2	0	0.00
	Pente >30%	0.3	0	0.00
Lacs, rivières		0.1	0	0.00
Ouvrages bleus	Bassins de rétention	1	0	0.00
	Noues et tranchées infiltrantes	0.1	0	0.00
	Jardins pluviaux	0.1	0	0.00
	Noues et tranchées drainantes	1	0	0.00
		Total	0	0.00
		Cr actuel [-]		

(1)
(2)
(3)

5. Coefficient de ruissellement optimal de la zone (Cr optimal)

Type d'affectation	Type de surface optimale	Cr optimal [-]	Surface [m²]	Surface réduite [m² _{red}]
Toit incliné, tuile, tôle, verre, fibrociment		0.95	0	0
Toit plat	Epaisseur du substrat >50cm (intensive)	0.1	0	0
Route à forte circulation	Revêtement pavés à joints serrés, bitumineux poreux	0.8	0	0
Route à faible circulation	Revêtements pavés à joints écartés	0.5	0	0
Place	Revêtements pavés à joints écartés	0.5	0	0
Trottoir	Revêtements pavés à joints écartés	0.5	0	0
Parking	Revêtement grilles-gazon, pavés-gazon	0.2	0	0
Aire de jeu	Herbe	0.1	0	0
Surface verte, jardin, pré, ... (pente <10%)		0.1	0	0
Surface verte, jardin, pré, ... (pente 10-30%)		0.2	0	0
Surface verte, jardin, pré, ... (pente >30%)		0.3	0	0
		Total	0	0.00
		Cr optimal [-]		

Le **coefficient de ruissellement optimal** moyen Cr_optimal est obtenu de la même façon que précédemment. L'aire optimale de chaque type de surface dépend de l'affectation de la parcelle.

Le coefficient de ruissellement actuel moyen sera comparé par la suite au coefficient de ruissellement optimal moyen pour évaluer l'indicateur d'infiltration.

CANALISATIONS

La capacité des canalisations est difficile à déterminer précisément de par la complexité des réseaux. Une première approche sera obtenue de manière simplifiée.

Afin d'avoir une valeur la plus représentative possible seules les canalisations principales seront prises en compte dans la modélisation. Connaissant leurs diamètres et longueurs, le volume est facilement obtenu.

6. Hypothèse sur la capacité des canalisations			
Diamètre des canalisations principales	Aire des canalisations	Longueur des canalisations	Volume des canalisations
[m]	[m ²]	[m]	[m ³]
	0.00		0.00
	0.00		0.00
	0.00		0.00
	0.00		0.00
	0.00		0.00
Volume hypothétique des canalisations [m³]	0.00		

VOLUME DE RETENTION THEORIQUE

7. Détermination de la hauteur maximale d'eau de pluie à retenir

Données de base	Temps de retour T	30 [ans]
	Débit de fuite Qf	0.20 [L/s/100m ² de surfaces imperméables]
	Débit de fuite Qf	0.002 [L/s/m ² de surfaces perméables]
	Débit spécifique qs	0.12 [mm/min]

Graphique	Durée [min]	Hp [mm]	He [mm]	Hp - He [mm]	ΔH_{max}
	10	29.17	1.20	27.97	35.6 [mm]
	15	31.25	1.80	29.45	
	20	31.67	2.40	29.27	
	30	35.00	3.60	31.40	
	60	42.00	7.20	34.80	
	120	50.00	14.40	35.60	
	180	54.00	21.60	32.40	
	240	60.00	28.80	31.20	
	300	65.00	36.00	29.00	
	360	66.00	43.20	22.80	
	480	68.00	57.60	10.40	
	600	70.00	72.00	-2.00	
	720	74.40	86.40	-12.00	
	1080	81.00	129.60	-48.60	
	1440	88.80	172.80	-84.00	

Le graphique illustre la relation entre la durée de pluie (en minutes) et les hauteurs d'eau de pluie à l'entrée (Hp) et à la sortie (He) du bassin de rétention. La courbe Hp (bleue) montre une augmentation progressive de la hauteur avec la durée, tandis que la courbe He (orange) augmente plus rapidement et finit par dépasser Hp à partir d'une durée de 600 minutes. Le point de tangence des deux courbes correspond à la hauteur maximale de rétention théorique ΔHmax de 35.6 mm.

Pour obtenir le volume de rétention théorique nécessaire pour compenser le ruissellement, il est nécessaire de connaître la hauteur maximale d'eau de pluie à retenir ΔH_{max} .

La hauteur d'eau des précipitations H_p en fonction de la durée de la pluie est obtenue avec les courbes IDF et un temps de retour de 30 ans.

La hauteur d'eau de sortie du bassin versant H_e dépend du débit spécifique q_s et du débit de fuite Q_f du bassin versant admis dans le PGEE.

Lorsque la différence de hauteur d'eau entre l'entrée et la sortie est positive ($H_p - H_e > 0$) il y a ruissellement, et la plus grande différence correspond à la hauteur maximale d'eau de pluie à retenir ΔH_{max} . Le graphe représente cette différence en fonction de la durée de la pluie.

Ici seulement q_s et Q_f sont potentiellement à modifier, dépendant du PGEE.

8. Détermination du volume de rétention théorique nécessaire

Volume de rétention brut	0.00 [m ³]
Volume de rétention net	0.00 [m ³]

Le volume de rétention brut est obtenu avec la surface réduite de la zone d'étude donc la surface imperméable et la hauteur maximale de ruissellement ΔH_{max} . A cela il faut soustraire la capacité des canalisations qui peuvent accueillir des eaux pluviales.

VOLUME DE RETENTION ACTUEL

Le volume de rétention actuel correspond simplement à la somme du volume de l'ensemble des ouvrages de rétention.

La matrice calcule les volumes à l'aide des dimensions, à moins que ceux-ci ne soient déjà connus. Dans ce cas le volume peut simplement être inscrit dans la colonne (1).

Pour certains ouvrages il est nécessaire de connaître sa porosité pour déterminer le volume (2).

9. Différents types de rétention			
Type de rétention artificielle (infrastructure grise)	Profondeur de l'ouvrage [m]	Surface de l'ouvrage [m ²]	Volume de rétention [m ³]
Fosse			0
Citerne			0
Bassin de rétention à ciel ouvert			0
Bassin de rétention fermé			0
Total du volume de rétention artificielle			0

Type de rétention environnementale (infrastructure bleu-verte)	Porosité [-]	Longueur de l'ouvrage [m]	Largeur de l'ouvrage [m]	Profondeur de l'ouvrage [m]	Base de l'ouvrage [m]	Volume de rétention [m ³]
Noues	Section courbe	-			-	0
	Section triangulaire	-			-	0
	Section trapézoïdale	-			-	0
Tranchées drainantes	Graves et galets	0.3				0
	Phanx de récupération	0.7				0
	Matériaux alvéolaires en plastique	0.9				0
Plan d'eau, étang humide	-					0
Bassin de rétention à ciel ouvert végétalisé	-					0
Jardin pluvial	-					0
Total du volume de rétention environnementale						0

10. Détermination des volumes de rétention actuels et nécessaires	
Volume actuel de rétention	0 [m ³]
Volume nécessaire de rétention (manquant)	0.00 [m ³]

Le volume de rétention manquant soustrait simplement le volume de rétention actuel au volume de rétention théorique.

STOCKAGE

La matrice permet de déterminer l'**évapotranspiration potentielle**. Celle-ci dépend de paramètres à modifier potentiellement en fonction de votre commune : température moyenne en été en 2050, radiation solaire directe et heures d'insolation (peu de changements au sein de la Suisse même).

L'**évapotranspiration réelle** dépend des coefficients de cultures. Elles n'ont donc pas à être modifié.

Surface	Herbe	
Coefficient de culture Kc	1.05 [-]	
ETR	162.91 [mm/mois]	
	5.43 [mm/j]	

Surface	Pâturage	
Kc	0.95 [-]	
ETR	147.39 [mm/mois]	
	4.91 [mm/j]	

Surface	Zone humide	
Kc	1.1 [-]	
ETR	170.66 [mm/mois]	
	5.69 [mm/j]	

Surface	Marécages	
Kc	1.2 [-]	
ETR	186.18 [mm/mois]	
	6.21 [mm/j]	

Les données de bases sont des moyennes de précipitations en fonction des saisons. Selon où se situe votre commune il est possible que vous ayez à modifier ces données (cf. [Office fédéral de météorologie et climatologie Météo Suisse, 2013]).

- (1) Le besoin en eau pour l'irrigation des plantes sur les toits végétalisés est calculé automatiquement par la matrice en fonction de l'évapotranspiration réelle et des pluies moyenne estivales.
- (2) Insérez la surface des toitures végétales pour chaque type de milieux verts.
- (3) Le volume de stockage nécessaire pour arroser les toitures végétalisées et alors calculé par la matrice.
- (4) La matrice analyse si il y a un surplus d'eau venant des toitures végétalisées qui pourrait être utilisé pour l'arrosage des plantes au sol, et le volume correspondant.
- (5) La même réflexion est faite pour analyser le besoin en eau pour l'irrigation des plantes au sol. Il est nécessaire d'insérer la surface de végétation au sol pour chaque type de milieux verts.
- (6) En insérant la surface des toits plats non végétalisés où de l'eau de pluie peut être recueillie, il est possible d'analyser la quantité d'eau de pluie qui peut être récoltée des toits en été et en hiver, suivant les précipitations de chaque saison.
- (7) Le déficit de pluie en été est modélisé par la matrice en analysant le volume de pluie pouvant être récolté des toits en été et le besoin des plantes en eau en été.
- (8) Ainsi suivant ce déficit et le volume de pluie pouvant être récolté des toits en hiver il est possible de connaître le nombre de mois de stockage nécessaire.
- (9) Le volume de stockage nécessaire dépend alors du potentiel besoin de stocker de l'eau avant l'été et du nombre de mois de stockage nécessaire. Il est automatiquement déterminé par la matrice.

14. Besoin I, récolte R et stockage S		
Données de base		
	Pluies moyennes en été en 2050 sur un mois	68 [mm/mois]
	Pluies moyennes en été en 2050 sur 3 mois	204 [mm/été]
	Pluies moyennes en hiver en 2050 sur un mois	85 [mm/mois]
(1)		
(2)	Type de surface - Toit végétalisé	Herbe
	Besoin en irrigation	94.91 [mm/mois]
(3)	Surface de toits végétalisés pour chaque type de surface	0.00 [m2]
	Besoin en eau pour l'irrigation	0.00 [m3/mois]
(4)	Besoin en eau total pour l'irrigation des toits - I	0.00 [m3/mois]
	Volume de stockage nécessaire pour les toits végétalisés	0.00 [m3]
	Surplus des toits pour irriguer les plantes au sol ?	non
	Surplus (stockage de l'eau des TV au sol pour les plantes au sol) [m3]	0.00 [m3/mois]
(5)	Type de surface - Végétation au sol	Herbe
	Besoin en irrigation	94.91 [mm/mois]
	Surface au sol	0.00 [m2]
	Besoin en eau pour l'irrigation	0.00 [m3/mois]
(6)	Besoin en eau total pour l'irrigation des sols - I	0.00 [m3/mois]
	Surface toits non végétalisés	0.00 [m2]
(7)	Quantité d'eau qui peut être récoltée des toits en été - R	0.00 [m3/mois]
	Quantité d'eau qui peut être récoltée des toits en hiver - R	0.00 [m3/mois]
(8)	Déficit de pluie après stockage en été	0.00 [m3]
	Nombre de mois de récolte nécessaire (hors période estivale)	#DIV/0! [mois]
	Nombre de mois > 9 ?	#DIV/0!
(9)	Nombre de mois de récolte nécessaire (hors période estivale)	#DIV/0! [mois]
	Volume de stockage nécessaire pour le sol	0.00 [m3]
	Volume de stockage TOTAL - S	0.00 [m3]
	Volume de stockage actuel	0.00 [m3]

CONTINUITÉ ECOLOGIQUE

3. Résistances de pixels

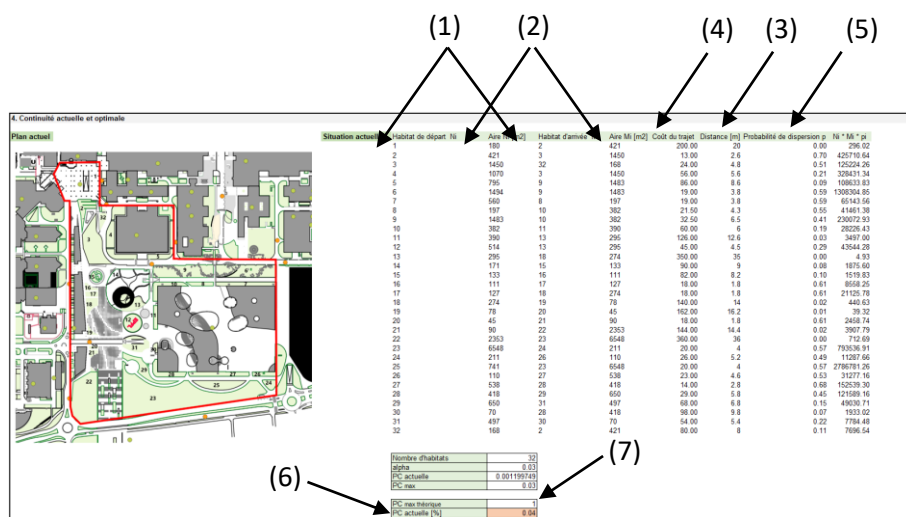
Types de surface	Résistance
Parc, jardin, zone boisée, toit végétal	0
Pavés engazonnés, graviers, sable, ...	5
Marre, étang, cours d'eau	5
Routes, surfaces imperméables, pavés, ...	10
Bâtiment <2m	10
Bâtiment 2<...<5m	20
Bâtiment >5m	50
Rivière, lac	50
Bâtiment avec façade végétale <2m	0
Bâtiment avec façade végétale 2<...<5m	0
Bâtiment avec façade végétale >5m	0

La continuité écologique entre des milieux verts dépend du coût du trajet entre ces milieux.

Ainsi le tableau ci-contre attribue les **résistances** de chaque type de surface. Plus une surface est difficile à traverser, plus la résistance sera élevée.

La modélisation de l'indicateur de continuité écologique est plus complexe à mettre en place. Voici les étapes :

- (1) Numérotez les habitats afin de définir pour chaque habitat de départ Ni l'habitat d'arrivée Mi le plus proche (selon le théorème du chemin le plus court ci-dessous).
- (2) Insérez les aires de chacun de ces habitats.
- (3) Insérez la distance entre chacune des paires de milieux référencées.
- (4) Insérez le coût du trajet. Il correspond à la multiplication entre la distance du trajet et la valeur de la résistance de type de surface traversée (cf. tableau ci-dessus).
- (5) La probabilité de dispersion du trajet est calculée par la matrice.
- (6) La **probabilité de connectivité actuelle PC_actuelle** est exprimée en pourcentage par rapport à la probabilité de connectivité maximale (7) (cette dernière étant dépendante du nombre d'habitats elle doit être normalisée).



Théorème du chemin le plus court :
Chaque habitat doit être lié à l'habitat le plus proche avec lequel il n'a pas encore été lié. Ceci permet d'éviter de créer des petits îlots.

L'indice de continuité écologique est évalué en comparant la probabilité de connectivité actuelle à la probabilité de connectivité optimale. Cette dernière est obtenue de la même façon que la probabilité de connectivité actuelle, en considérant comme état optimal que les plats toits soient entièrement végétalisés, que toutes les façades soient végétalisées (changement dans la résistance de certains trajets), un revêtement en pavés engazonnés pour les parkings, un revêtement en herbe pour les aires de jeu.

DIVERSITE DES MILIEUX

8 milieux ont été recensés comme milieux verts favorables pour le développement des papillons indigènes.

La première étape consiste à relever l'aire de chaque type de milieu.

6. Milieux favorables aux papillons diurnes indigènes	
Types de milieux	Surface
	[m2]
Pré fleuri (espace avec peu de fauchage)	0.00
Surfaces / végétation rudérale	0.00
Pelouse (espace avec beaucoup de fauchage)	0.00
Zones boisées	0.00
Vergers, vignes, jardins potagers	0.00
Fossés, noues et zones humides	0.00
Toitures végétales	0.00
Façades végétales	0.00
Total	0

L'indice de diversité est déterminé à l'aide de l'indice de Shannon H' :

- (1) La proportion de chaque type de surface est déterminée en fonction de la surface totale des milieux verts.
- (2) L'indice de Shannon est calculé par la matrice.
- (3) L'indicateur de diversité des milieux compare H' obtenu par rapport à l'indice de Shannon maximal : $H'_{max} = \ln(N)$.

7. Indice de diversité de Shannon		
Nombre de "milieux de biodiversité" (N)	8	
Proportion de la surface (p _i)	log ₂ (p _i)	p _i *log ₂ (p _i)
[-]		
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
1.00	0.00	0.00
Indice de diversité de Shannon H	0.00	
Indice de diversité H maximum	#NOMBRE!	
50% de H max	#NOMBRE!	

Confort

ALBEDO

L'albedo s'obtient rapidement de la façon suivante :

- (1) Insérez l'aire de **chaque type de surface** (sol et façades).
- (2) Le rayonnement solaire est calculé automatiquement avec l'albedo des surfaces.
- (3) L'**albedo total** est ainsi modélisé par la matrice.
- (4) Le **rayonnement solaire** reçu dépend de la **température moyenne estivale**. Celle-ci peut dépendre de votre région est peut être à modifier (cf. [Office fédéral de météorologie et climatologie Météo Suisse, 2013]).

4. Albedo			
Données de base		Température moyenne en été en 2050	22.75 [°C]
		Rayonnement solaire reçu	331.57 [W/m²]
Type de surface	Albedo [-]	Surface [m²]	Rayonnement solaire renvoyé [W]
Etendue d'eau	0.06	0	0.00
Asphalte, goudron, revêtements superficiels noirs	0.07	0	0.00
Béton bitumineux (noir)	0.15	0	0.00
Arbre	0.15	0	0.00
Béton (gris)	0.25	0	0.00
Dalles engazonnées	0.3	0	0.00
Dalles pavés (gris clair, beige)	0.45	0	0.00
Herbe, prairie	0.3	0	0.00
Sable	0.18	0	0.00
Graviers blancs	0.45	0	0.00
Bois (marron, gris clair)	0.35	0	0.00
Terre, sol nu	0.2	0	0.00
Vitre	0.06	0	0.00
Tuile rouge, brune	0.35	0	0.00
Brique rose/rouge	0.4	0	0.00
Brique marbée (pourpre)	0.23	0	0.00
Marbre blanc	0.56	0	0.00
Aluminium	0.46	0	0.00
Peinture / enduit noir	0.1	0	0.00
Peinture / enduit bleu, bleu foncé	0.2	0	0.00
Peinture / enduit vert, rouge, brun	0.4	0	0.00
Peinture / enduit rose, gris,...	0.6	0	0.00
Peinture / enduit blanc cassé, crème	0.8	0	0.00
Peinture / enduit blanc	0.9	0	0.00
Total		0.00	0.00

Rayonnement solaire renvoyé	#DIV/0!	[W/m²]
Albedo total	#DIV/0!	[-]

(4)

(1)

(2)

(3)

OMBRE

Après avoir inséré la surface de chaque type d'ombre (1), la surface ombragée totale est comparée avec la surface totale au sol (2).

Pour la catégorie "arbre", l'entièreté de la surface de la canopée est prise en compte, pas seulement la surface ombragée accessible.

5. Ombre		
Type de protection	Surface	Fichiers
	[m²]	
Arbre	0	
Toit	0	
Pergola	0	
Toile	0	
Total	0	
Surface au sol		[m²]
Pourcentage de surface ombragée	#DIV/0!	[%]

(1)

(2)

SONDAGE "MOBILIER URBAIN"

Une fois les résultats du sondage reçus, ils peuvent être analysés directement par la matrice. La matrice doit être remplie avec des pourcentages.

Pour la **quantité de mobilier** :

- (1) Le pourcentage de chaque catégorie de satisfaction (suffisant, insuffisant, absent) est inséré pour chaque mobilier.
- (2) La matrice calcul automatiquement le pourcentage de chaque catégorie de satisfaction et en déduit la catégorie représentative (3).

(1) Quantité : Comment jugez-vous la quantité de chaque type de mobilier suivant?	Suffisant	Insuffisant	Absent
Bancs ou mobilier pour s'asseoir			
Table extérieure			
Point d'eau potable			
Terrain de jeu/sport			
Potager			
Fontaine			
Jet d'eau au sol/brumisateur			
TOTAL	0.00	0.00	0.00
RESULTAT	Absent		

Pour la **qualité du mobilier** :

- (1) Le pourcentage de chaque catégorie de satisfaction (suffisamment ombragés, insuffisamment ombragés) est inséré pour chaque mobilier.
- (2) La matrice calcul automatiquement le pourcentage de chaque catégorie de satisfaction et en déduit la catégorie représentative (3).

(1) Qualité : Comment jugez-vous la qualité de chaque type de mobilier suivant en termes d'ombrage? Rappel : Veuillez considérer une belle journée ensoleillée d'été!	Suffisamment ombragés	Insuffisamment ombragés	Mobilier absent dans cette zone
Bancs			
Tables extérieures			
Terrain de jeu/sport			
Trottoirs/chemins			
Nombre de type de mobilier		0	
TOTAL	#DIV/0!	#DIV/0!	
RESULTAT	#DIV/0!		

L'étude de la nécessité ou non des différents types de mobilier, du temps que les usagers pourraient passer dans la zone ou les remarques et suggestions des usagers permettent de donner des indications supplémentaires pour la planification de solutions. Ces informations n'agissent pas directement dans le résultat de l'indicateur "Mobilier urbain".

MATRICE BLEUE-VERTE

Le dernier onglet représente la Matrice Bleue-Verte finale composée de tous les indicateurs et leur résultat.

Pour chaque indicateur :

- (1) L'échelle de la matrice est énoncée.
- (2) Les valeurs qui sont comparées sont affichées afin d'avoir un résumé de l'analyse.
- (3) Une couleur est attribuée à l'indicateur en fonction du résultat de l'analyse et selon l'échelle attribuée à l'indicateur.

(1)

Indicateur : E1 - Infiltration			
ROUGE	ORANGE	JAUNE	VERT
$Ci\ moyen \leq 0.25 * Ci\ optimal$	$0.25 * Ci\ optimal < Ci\ moyen \leq 0.5 * Ci\ optimal$	$0.5 * Ci\ optimal < Ci\ moyen \leq 0.75 * Ci\ optimal$	$0.75 * Ci\ optimal < Ci\ moyen$
Ci moyen			0.46
Ci optimal			0.79
Couleur de l'indicateur			0.58

(2)

Indicateur E2 - Rétention			
ROUGE	ORANGE	JAUNE	VERT
$Vactuel \leq 0.25 * Vthéorique$	$0.25 * Vthéorique < Vactuel \leq 0.5 * Vthéorique$	$0.5 * Vthéorique < Vactuel \leq 0.75 * Vthéorique$	$0.75 * Vthéorique < Vactuel$
Vactuel		534.4 [m3]	
Vthéorique		965.16 [m3]	
Couleur de l'indicateur		55.37 [%]	

(3)

Indicateur E3 - Stockage en eau			
ROUGE	ORANGE	JAUNE	VERT
$Vactuel \leq 0.25 * Vthéorique$	$0.25 * Vthéorique < Vactuel \leq 0.5 * Vthéorique$	$0.5 * Vthéorique < Vactuel \leq 0.75 * Vthéorique$	$0.75 * Vthéorique < Vactuel$
Vactuel		0.00 [m3]	
Vthéorique		3833.34 [m3]	
Couleur de l'indicateur		0.00 [%]	

Finalement, un tableau résume la valeur de chaque indicateur (très faible, faible, moyen, élevé), et un diagramme en radar se forme, permettant de visualiser et communiquer les résultats.

REFERENCES

- Ville de Lausanne. Directive municipale relative aux mesures de gestion des eaux claires. Décembre 2016.
- Cereg. Fiche n°1 – Bassins de rétention
- Bruxelles Environnement. Pluies de référence pour le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux de pluviales et des eaux résiduaires urbaines en Région de Bruxelles-Capitale. Décembre 2018.
- Zeller, J., et al. Précipitations extrêmes dans les Alpes suisses et leurs régions limitrophes. 1979.
- Jacques Beauchamp. L'eau et le sol. Juillet 2016.
- Savva, A., et al. Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling - Irrigation Manual. Module 4, 2002.
- Estelle Rochat. Impact du processus d'urbanisation sur la connectivité fonctionnelle et la diversité génétique dans les agglomérations Genevoise et Marseillaise. Projet de master, juin 2014.
- Office fédéral de l'environnement. Quand la ville surchauffe - Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. 2018.
- ADEME. Eau, végétation, albedo – évaluation quantitative de l'impact sur le microclimat, les consommations énergétiques des bâtiments et le confort intérieur et extérieur de trois principes de rafraîchissement urbain. Avril 2016.
- Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse. Scénarios climatiques Suisse – un aperçu régional. Rapport technique n°243, 2013.

9.3 Infiltration

Table 9.1: Coefficients de ruissellement selon le type de surface [Yang et al., 2021], [Etat de Fribourg, 2019], [Ville de Morges, 2020].

Type de surface		C_r
Toit incliné recouvert de tuile, tôle, verre, fibrociment		0.95
Toit plat recouvert de graviers		0.8
Toit plat végétalisé	Épaisseur du substrat > 50cm (intensive)	0.1
	Épaisseur du substrat 25-50cm (semi-intensive)	0.2
	Épaisseur du substrat 10-25cm (extensive)	0.4
	Épaisseur du substrat < 10cm	0.7
Routes, trottoirs, places et chemins	Revêtements asphalte, béton	0.9
	Revêtement pavés à joints serrés, bitumineux poreux	0.8
	Revêtements graveleux	0.6
	Revêtements pavés à joints écartés	0.5
	Revêtements graviers	0.4
	Revêtements grilles-gazon, pavés-gazon	0.2
Milieux verts, jardins, prés	Pente < 10%	0.1
	Pente 10-30%	0.2
	Pente > 30%	0.3

Table 9.2: Coefficients de ruissellement optimaux selon l'affectation des parcelles

Type d'affectation des parcelles	Revêtement optimal	C_r optimal
Toits inclinés recouverts de tuile, tôle, verre, fibrociment		0.95
Toits plats	Épaisseur du substrat > 50cm (intensive)	0.1
Routes à forte circulation	Revêtement pavés à joints serrés, bitumineux poreux	0.8
Routes à faible circulation	Revêtements pavés à joints écartés	0.5
Places	Revêtements pavés à joints écartés	0.5
Trottoirs	Graviers	0.4
Parking	Revêtement grilles-gazon, pavés-gazon	0.2
Aires de jeu	Herbe	0.1
Milieux verts, jardins, prés (pente < 10%)		0.1
Milieux verts, jardins, prés (pente 10-30%)		0.2
Milieux verts, jardins, prés (pente > 30%)		0.3

9.4 Rétention

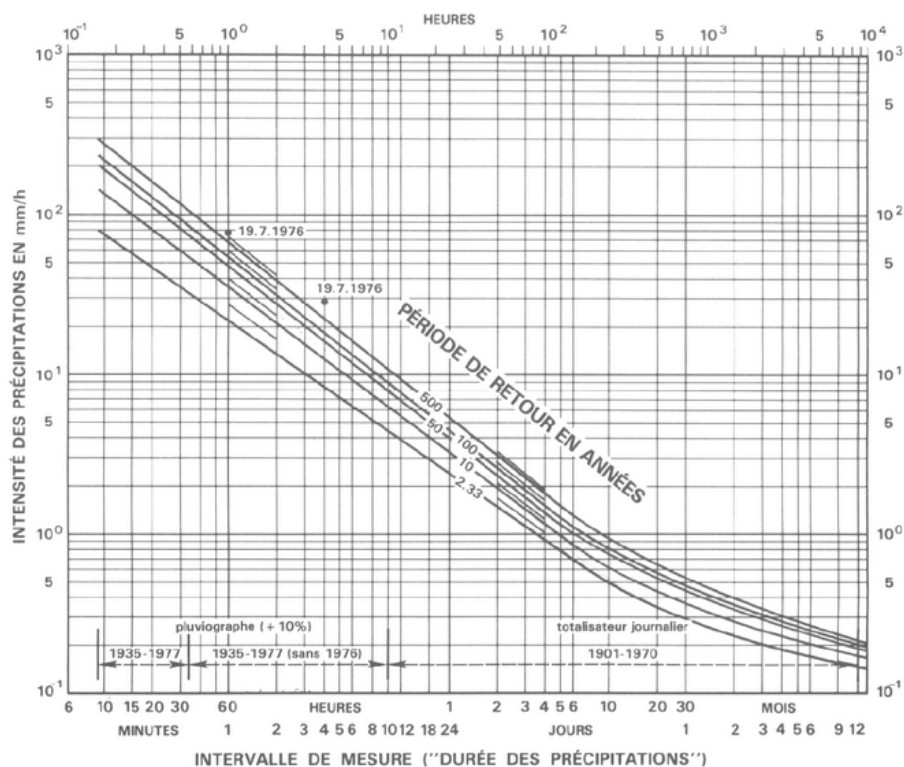


Figure 9.2: Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la station de Lausanne [Zeller et al., 1979].

9.5 Continuité écologique

En analysant la formule de probabilité de connectivité (3.12), celle-ci sera maximale quand les N milieux verts seront de même surface et exactement côte à côte. Ainsi, la probabilité de connectivité maximale s'obtient de la façon suivante (où a_i représente tous les milieux verts, A l'aire totale des milieux verts et les $p*_i$ valent 1 car la distance et donc le coût du trajet est de 0) :

$$\begin{aligned}
 PC_{max} &= \frac{a_1 * a_2 * p*_1}{A^2} + \frac{a_2 * a_3 * p*_2}{A^2} + \dots + \frac{a_{N-1} * a_N * p*_N}{A^2} \\
 &= \frac{a^2 * e^0}{A^2} + \frac{a^2 * e^0}{A^2} + \dots + \frac{a^2 * e^0}{A^2} \\
 &= \frac{N * a^2}{(N * a)^2} \\
 &= \frac{1}{N}
 \end{aligned} \tag{9.1}$$

9.6 Albedo

Table 9.3: Albedo pour chaque revêtement [ICARE et al., 2012], [Les Services de Bordeaux Métropole, 2017].

Type de surface	α
Étendue d'eau	0.06
Asphalte, goudron, revêtements superficiels noirs	0.07
Vitre	0.08
Béton bitumineux (noir)	0.15
Arbre	0.15
Sable	0.18
Terre, sol nu	0,2
Béton (gris)	0.25
Dalles engazonnées	0.3
Herbe prairie	0.3
Bois (marron)	0,35
Dalles, pavés (gris clair, beige)	0.45
Graviers blancs	0.45
Tuile rouge, brune	0.35
Brique rose, rouge	0.4
Brique marbrée (pourpre)	0.23
Marbre blanc	0.56
Aluminium	0.46
Peinture / enduit noir	0.1
Peinture / enduit bleu, bleu foncé	0.2
Peinture / enduit vert, rouge, brun	0.4
Peinture / enduit rose, gris	0.6
Peinture / enduit blanc cassé, crème	0.8
Peinture / enduit blanc	0.9

9.7 Mobilier urbain

Évaluation du confort en milieu urbain

Ce sondage est mené dans le cadre d'un projet de master pour étudier le confort des usagers en zone urbaine et donc questionner les populations concernées.

Dans ce cas d'étude, le questionnaire est appliqué à 3 zones du campus EPFL, mais il a pour vocation d'être utilisé pour des quartiers de diverses communes.

Pour chacune des 3 zones, 6 mêmes questions sont posées. Les zones sont représentées sur chaque carte en début de partie.

Pour répondre à ce questionnaire, veuillez considérer une belle journée ensoleillée d'été !

Proposition de texte introductif pour un sondage auprès des communes :

Dans le cadre de l'étude de l'adaptation de votre commune au changement climatique nous aimerions étudier le confort de la population en zone urbaine. En effet il est important que le mobilier et les infrastructures dans les villes répondent aux besoins de la population, aux activités du quartier et à l'évolution du climat.

Pour cette raison ce sondage nous permettra d'évaluer votre ressenti, vos besoins et envies pour améliorer la commune en termes de résilience au changement climatique. Pour chacun des quartiers, 6 mêmes questions sont posées. Les quartiers sont représentés sur chaque carte en début de partie.

Pour répondre à ce questionnaire, veuillez considérer une belle journée ensoleillée d'été !

Délai de réponse : ...

Zone 1 - Avenue Piccard et ses environs



1. Quantité : Comment jugez-vous la quantité de chaque type de mobilier suivant ?

	Suffisant	Insuffisant	Absent
Bancs ou mobilier pour s'asseoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table extérieure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Point d'eau potable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terrain de jeu/sport	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Potager	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fontaine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jet d'eau au sol / brumisateur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. Comment jugez-vous leur nécessité ?

	Nécessaire	Non nécessaire
Bancs ou mobilier pour s'asseoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table extérieure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Point d'eau potable	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terrain de jeu/sport	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Potager	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Fontaine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Jet d'eau au sol / brumisateur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. Qualité : Comment jugez-vous la qualité de chaque type de mobilier suivant en termes d'ombrage ? Rappel : veuillez considérer une belle journée ensoleillée d'été !

	Suffisamment ombragés	Insuffisamment ombragés	Mobilier absent dans cette zone
Bancs ou mobilier pour s'asseoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table extérieure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terrain de jeu/sport	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trottoirs/chemins	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4. Comment jugez-vous leur nécessité ?

	Nécessaire	Non nécessaire
Bancs ou mobilier pour s'asseoir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Table extérieure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Terrain de jeu/sport	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Trottoirs/chemins	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. En termes de confort, vous pourriez passer combien de temps dans cette zone ? (Rappel : veuillez considérer une belle journée d'été)

- Je pourrais seulement y passer si c'est sur mon chemin.
- Je pourrais m'y arrêter pour attendre un·e ami·e (env. 15 min).
- Je pourrais y faire une pause (env. 1h).
- Je pourrais y passer plusieurs heures.

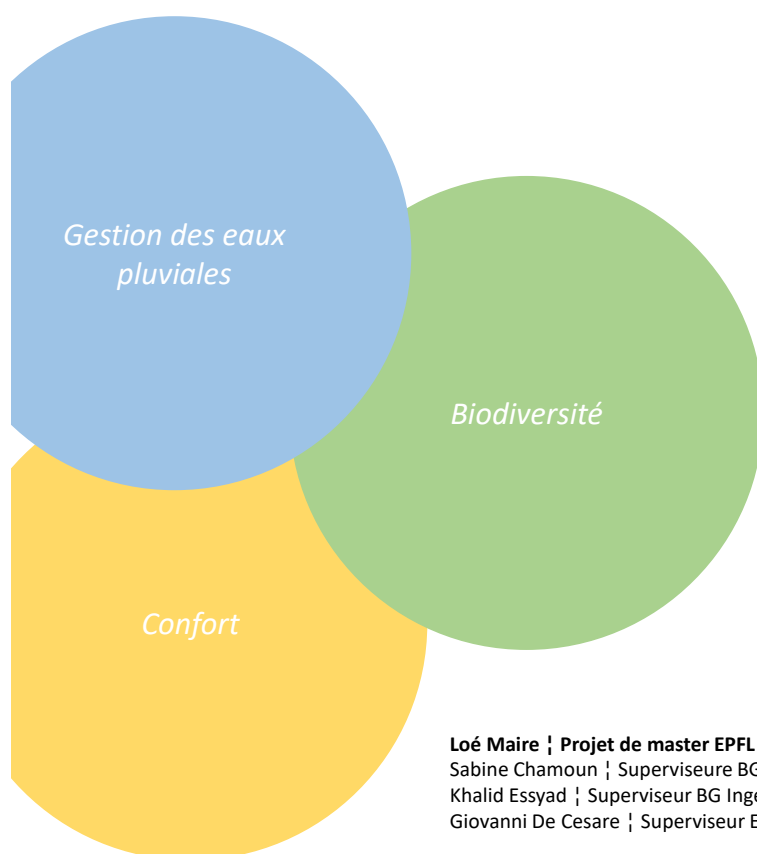
6. Avez-vous des remarques ou suggestions quant à l'ombrage, aux installations et au confort de cette zone ?

9.8 Catalogue de solutions techniques

Adaptation des villes au changement climatique

-

Catalogue de solutions techniques



Loé Maire † **Projet de master EPFL**
Sabine Chamoun † Superviseure BG Ingénieurs Conseils
Khalid Essyad † Superviseur BG Ingénieurs Conseils
Giovanni De Cesare † Superviseur EPFL

Version mars 2022



Mesures d'adaptation des villes au changement climatique



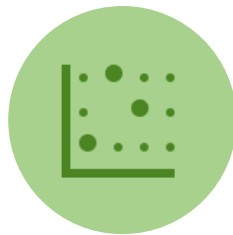
INFILTRATION



RETENTION



STOCKAGE



**CONTINUITE
ECOLOGIQUE**



**DIVERSITE
DES MILIEUX**



ALBEDO



OMBRE



**MOBILIER
URBAIN**

REVETEMENT POREUX



■ Bénéfices

- Recharge des nappes phréatiques.
- Création de microclimats favorables à la faune et à la flore.

■ Contraintes

- Le choix du type de revêtement doit tenir compte de la charge de pression au sol selon le type de véhicule (Adaptés pour des lieux à faible trafic).
- Non adaptés pour des routes en pente.
- Non adaptés pour les lieux où la nappe phréatique remonte à la surface.
- Problèmes de colmatage possibles. Nécessité de les nettoyer au minimum tous les six mois afin de garder leur efficacité.
- Faire attention au potentiel de perméabilité naturel du sous-sol en place.
- Difficultés pour déneiger ce type de revêtement.

■ Coûts

- Opérationnels : faibles
- De maintenance : faibles

■ Pour aller plus loin

- [Ville de Neuchâtel et al., 2004] Ville de Neuchâtel et al. (2004). Les revêtements perméables - conseils pour la réalisation et l'entretien.



© SEPA, 2021. Pavés à joints écartés.



© Petty Son & Prestwich, 2021. Pavés gazon.

TRANCHEES POREUSES (DRAINANTES OU INFILTRANTES)



▪ Bénéfices

- Dans le cas d'une tranchée infiltrante : recharge des nappes phréatiques.
- Faible emprise foncière. Possibilité de marcher dessus.

▪ Contraintes

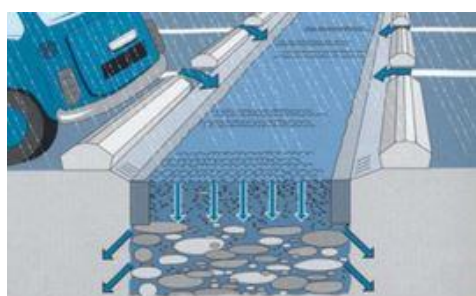
- Prévoir une distance suffisante entre les bâtiments et la surface infiltrante.
- Problèmes de colmatage possibles. Nécessite un entretien régulier et une sortie de vidange.

▪ Coûts

- Opérationnels : faibles
- De maintenance : faibles

▪ Conseils de mise en place

- Sur un sol perméable : tranchée infiltrante.
- Sur un sol imperméable ou si l'infiltration est interdite à cet endroit : tranchée drainante.
- Différents matériaux poreux existent avec une porosité variable : galet (porosité de 0.3), pneus de récupération (porosité de 0.7), matériaux en plastique alvéolaire (porosité de 0.9).



© GUIDEnR HQE



© Bernard Boccara

NOUES ET DEPRESSIONS HUMIDES (DRAINANTES OU INFILTRANTES)



■ Bénéfices

- Effets positifs sur le paysage.
- Développement de biodiversité et espace de vie par temps sec : multifonctionnalité.
- Dans le cas d'une noue infiltrante : recharge des nappes phréatiques
- Entretien facile grâce aux pentes douces qui permettent l'accès des machines d'entretien.

■ Contraintes

- Peut causer des problèmes d'odeur et être un lieu de développement des moustiques.
- Prévoir une distance suffisante entre les bâtiments et la surface infiltrante.

■ Coûts

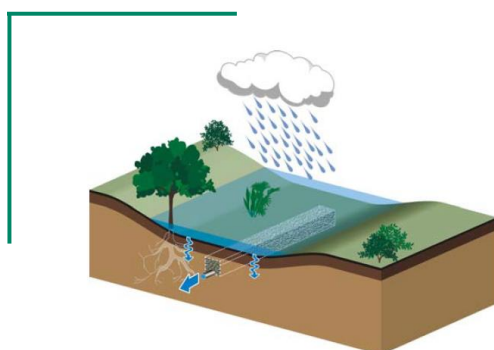
- Opérationnels : faibles
- De maintenance : faibles

■ Conseils de mise en place

- Sur un sol perméable : noue infiltrante.
- Sur un sol imperméable ou si l'infiltration est interdite à cet endroit : noue drainante.
- Les plantations (arbustes, arbres) permettront une meilleure infiltration grâce à leur système racinaire

■ Pour aller plus loin

- [Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2010]. Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (2010). La noue.



© Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2010.



© GUIDEnR HQE

BASSIN DE RETENTION ENTERRE



■ Bénéfices

- Simple à designer et concevoir
- Peut être dissimuler dans le sous-sol et permet de libérer de l'espace au sol.

■ Contraintes

- Emprise dans le sous-sol élevée. Les sous-sols urbains étant déjà beaucoup saturés, il est difficile d'en concevoir en plein centre urbain.
- N'est pas considérée comme une infrastructures bleu-verte. C'est une infrastructure grise qui ne permet pas de créer un espace multifonctionnel pour la biodiversité ou les activités de loisirs.

■ Coûts

- Opérationnels : élevés
- De maintenance : élevés

■ Pour aller plus loin

- Suivre les recommandations du PGEE en ce qui concerne le dimensionnement du volume de rétention minimum par mètres carrés de surface imperméable, ainsi que le débit sortant maximum.



© 2022 GRAF

BASSIN DE RETENTION A CIEL OUVERT



■ Bénéfices

- Simple à designer et concevoir.
- Simple à entretenir.
- Développement de biodiversité et espace de vie par temps sec : multifonctionnalité.

■ Contraintes

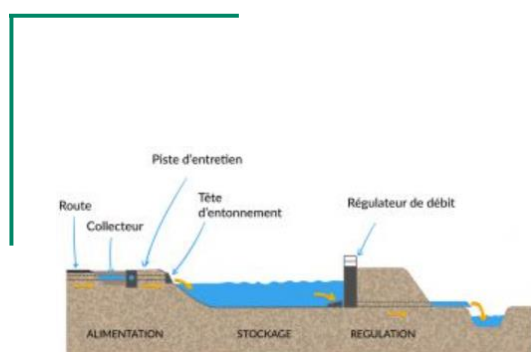
- Nécessité beaucoup de place donc difficile à concevoir en plein centre urbain.
- Peut causer des problèmes d'odeur et être un lieu de développement des moustiques.
- Possibilité de dépôts de boues de décantation et de flottants.

■ Coûts

- Opérationnels : élevés
- De maintenance : moyens

■ Pour aller plus loin

- Suivre les recommandations du PGEE en ce qui concerne le dimensionnement du volume de rétention minimum par mètres carrés de surface imperméable, ainsi que le débit sortant maximum.
- Dans le cas d'un bassin d'infiltration : mise en place d'un géotextile (sépare, filtre, améliore le drainage, renforce et répartit plus efficacement les charges imposées aux sols et surfaces).
- Dans le cas d'un bassin complètement étanche : mise en place d'une géomembrane.
- Favorise la végétation par rapport à un bassin en béton : mise en place d'un gazon résistant à l'eau et à l'arrachement, de végétaux dont le système racinaire permet la stabilisation du sol.



© Hellopro



© AXneuro 2019-2020.

TOITURES VEGETALES



■ Bénéfices

- Effets positifs sur le paysage
- Apport de biodiversité et purification de l'air
- Effet isolant : bénéfiques au niveau de la thermique des bâtiments, économie d'énergie sur les bâtiments.
- Réduction des îlots de chaleur : l'évapotranspiration apporte de la fraîcheur
- Possibilité de combiner toitures végétales et panneaux solaires : grâce à l'évapotranspiration les plantes améliorent l'efficacité des panneaux solaires; grâce à l'apport d'ombre les conditions de croissance pour la biodiversité sont plus diversifiées.

■ Contraintes

- La structure du bâtiment doit pouvoir supporter le poids supplémentaire du substrat.
- Dépendantes des conditions climatiques. Nécessité de mettre en place des plantes adaptées à un climat pouvant fortement varier (de très humide à très sec).
- Problèmes de colmatage possibles. Nécessite un entretien régulier et une sortie de vidange.

■ Coûts

- Opérationnels : élevés
- De maintenance : moyens

■ Pour aller plus loin

- [Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne, 2015] Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne (2015). Toitures végétalisées – pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit?
- [Société suisse des ingénieurs et des architectes, 2013] Société suisse des ingénieurs et des architectes (2013). Norme SIA SN 564 312 – Végétalisation des toitures.
- Site : www.lausanne.ch/toitures-vegétalisées



© Loé maire



© Benoît Renevey

JARDINS PLUVIAUX



■ Bénéfices

- Effets positifs sur le paysage (ajout de contraste, élévation et texture).
- Purification de l'eau avant infiltration.
- Habitat pour la biodiversité.
- Facile à concevoir et aménager.

■ Contraintes

- Plutôt adaptés pour de petits espaces.
- Dans le cas d'un sol imperméable ou d'une eau polluée il est impossible d'infiltrer et nécessite l'installation d'un drain pour évacuer.
- Besoin de plantes adaptées à une alternance de sécheresse et inondation.

■ Coûts

- Opérationnels : moyens
- De maintenance : moyens

■ Conseils de mise en place

- Sur un sol perméable : créer une dépression.
- Sur un sol imperméable : mise en place d'une géomembrane. Le substrat doit être composé de gravier dans le fond, de sable ensuite et à la surface d'un mélange terre pierre ou remblais.
- Diversifier les plantes pour augmenter le traitement, favoriser les plantes indigènes, ne nécessitant pas de fertilisant et adaptées à une alternance de sécheresse et inondation.

■ Pour aller plus loin

- Franti T, Rodie S. Conception d'un jardin de pluie – Guide pour choisir l'emplacement et les dimensions. Université du Nebraska, 2013.



© Antoine Meyssonier

CUVES DE STOCKAGE



■ Bénéfices

- Simple à designer et concevoir
- Peuvent être dissimulées dans le sous-sol et permet de libérer de l'espace au sol.
- Permet de réutiliser l'eau pour l'arrosage ou les sanitaires.

■ Contraintes

- Doit être placées proche de toitures.
- L'eau recueilli des toits doit provenir en préférence de toits plats sans plomb, aluminium ou cuivre.

■ Coûts

- Opérationnels : élevés
- De maintenance : élevés



© 2022 GRAF

CREATION DE MILIEUX VERTS DIVERSIFIES



■ Bénéfices

- Création de milieux favorables au développement de la faune et de la flore.
- Entretien des espèces indigènes et limitation des espèces invasives.
- Augmentation de l'évapotranspiration et apport de fraîcheur en ville.
- Diminution du ruissellement.
- Réduction du bruit en milieu urbain.

■ Contraintes

- Faire attention à ne pas changer l'affectation de toutes les parcelles. Par exemple une route doit pouvoir rester fonctionnelle, des chemins accessibles en fauteuils roulants doivent être maintenus.

■ Coûts

- Opérationnels : faible
- De maintenance : faible

■ Conseils de mise en place

- Création de différents milieux, de différentes tailles et à différentes hauteurs. Par exemple : Pré fleuri (espace avec peu de fauchage), pelouse (espace avec beaucoup de fauchage), conserver des surfaces rudérales, zones boisées, jardins potagers, noues et zones humides, toitures et terrasses végétales, façades végétales.



© Service de la Durabilité de l'EPFL

AMENAGER DES MILIEUX STRUCTURANTS LES MILIEUX VERTS



▪ Bénéfices

- Lieux d'habitation, de source de nourriture ou de reproduction pour la biodiversité.
- Faciles à mettre en place.
- Utilisation de matériaux locaux.

▪ Contraintes

- Ne convient pas pour tout type de milieux verts. Par exemple pour une aire de jeu avec pelouse, il sera difficile de l'entretenir avec ce type de structures.

▪ Coûts

- Opérationnels : faible
- De maintenance : faible

▪ Conseils de mise en place

- Exemples de structures : branches, pierres, tas de bois, feuilles mortes, paille, hôtel à insectes, pots de fleur vides, briques, ...
- A mettre en place dans les parcs, sur les toits, les terrasses, dans les jardins, ...

▪ Pour aller plus loin

- Parc régional Chasseral. Fiche thématique – Petites structures. 2021.



© Aino Adriaens



© Benoît Renevey

REVETEMENTS CLAIRS



▪ Bénéfices

- Apport de fraîcheur en zone urbaine.

▪ Contraintes

- Faire attention de ne pas aller dans une extrémité avec un albedo au-delà de 0.8 : risque d'éblouissement.
- Le choix de matériaux et de teintes doit être réalisé en cohérence avec les recommandations en matière de couleurs des façades du service urbanisme de la ville.

▪ Coûts

- Opérationnels : faible
- De maintenance : faible

▪ Conseils de mise en place

- Exemples : peindre les chaussées en blanc, choisir des revêtements tels que des graviers ou pavés clairs.
- En comparaison avec le bitume, la végétation permet aussi de réduire l'albedo.



© Los Angeles Bureau of Street Services



© Wikipedia - Trottoir

INSTALLATION DE MOBILIER URBAIN



■ Bénéfices

- Apport de confort à la population.
- Création d'un réel espace de vie.
- Possibilité de coupler du mobilier urbain avec des ouvrages de gestion des eaux de pluies ou des ouvrages qui apportent de la biodiversité.
- Faire de l'eau une expérience pour les usagers.

■ Contraintes

- Assurer un ombrage suffisant à ce mobilier urbain.

■ Coûts

- Opérationnels : faible
- De maintenance : faible

■ Conseils de mise en place

- Varier le mobilier et l'ombrage : banc, table, terrain de jeu, fontaine, potager, ...



© Urban Canopee



© STEVE LE CLECH PHOTOS

CREATION D'OMBRE ARTIFICIEL



■ Bénéfices

- Apport de confort à la population.
- Création d'un réel espace de vie.
- Peut être temporaire en fonction de la saison et des besoins.

■ Contraintes

- Non naturel et n'apporte donc pas de fonctionnalité supplémentaire au niveau de la biodiversité ou la gestion des eaux de pluies.

■ Coûts

- Opérationnels : faible
- De maintenance : faible

■ Conseils de mise en place

- Varier la quantité et le type d'ombrage : Toit prolongé, pergola, toile,

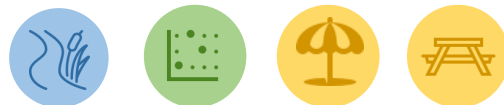


© Claudia Comte



© Hufton+Crow

CREATION D'OMBRAGE NATUREL (ARBRES)



■ Bénéfices

- Multiples bénéfices dans les trois thématiques : augmentation de l'infiltration de l'eau, augmentation de la continuité écologique et abrite la faune et la flore, apport d'ombre, amélioration de la qualité et quantité des aménagements extérieurs.
- Régule la température en ville : augmente l'évapotranspiration.
- Réduction du bruit en milieu urbain.
- Produit de l'oxygène et purifie l'air

■ Contraintes

- Besoin d'un espace vital suffisant pour se développer : favoriser la mise en place de fosses de Stockholm.
- Protéger le pied de l'arbre de possibles compactage (piétinements, écrasements réguliers)

■ Coûts

- Opérationnels : faibles
- De maintenance : faibles

■ Pour aller plus loin

- Ville de Lausanne. Les arbres à Lausanne. Septembre 2015.



© CERFO, 2008.

REFERENCES

- Wang H, Mei C, Liu J H, et al. A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city. *Sci China Tech Sci*, 2018, 61: 317–329, <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9170-5>
- Chan FKS, et al. “Sponge City” in China - A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy*, 2018, 7: 772-778, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>.
- Gogate N. et al. Assessment of stormwater management options in urban contexts using Multiple Attribute Decision-Making. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2046-2059, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.079>
- Ville de Neuchâtel. Les revêtements perméables – Conseils pour la réalisation et l'entretien. Economat de la Ville de Neuchâtel, mai 2004.
- Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement. La noue. Décembre 2010.
- Cereg. Fiche n°1 – Bassins de rétention
- Service des parcs et domaines de la Ville de Lausanne. Toitures végétalisées – pourquoi et comment accueillir la nature sur sont toit?. Groux arts graphiques SA, 2015, 2ème édition.
- Czemieli Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 351-360, doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.014.
- Ville de Sion. Guide des aménagements extérieurs. Novembre 2017.
- Bruxelles Environnement. Dispositif - Jardins de pluie.
- Office fédéral de l'environnement. Quand la ville surchauffe - Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. 2018.
- Ville de Lausanne. Les arbres à Lausanne. Septembre 2015.
- Ville de Lille. Choisir les matériaux et coloris des espaces extérieurs, toitures et façades en tenant compte de leur albedo et de leur émissivité. *Pacte Lille Bas Carbone*, Août 2021.
- Lessard G., Boulfroy E. , 2008. Les rôles de l'arbre en ville. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Québec, 21 p

9.9 Plan de l'EPFL



Figure 9.3: Plan de l'EPFL.

9.10 Solutions zone EST

Détail de l'ouvrage de sortie - Noue infiltrante
Échelle : 1:10

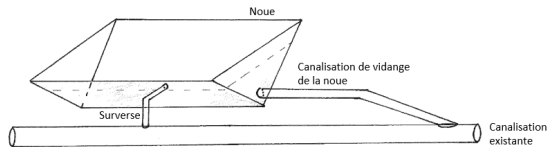


Figure 9.4: Schéma de principe de l'ouvrage de sortie de la noue infiltrante.

Détail de l'ouvrage de sortie - Tranchée drainante
1:20

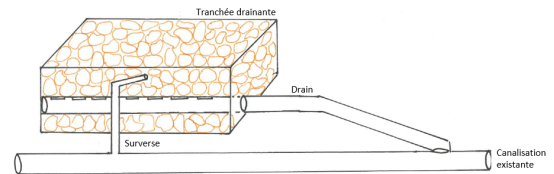


Figure 9.5: Schéma de principe de l'ouvrage de sortie de la tranchée drainante.

Schéma de principe du réseau de canalisations des EC à la sortie des ouvrages de rétention
Échelle : 1:140

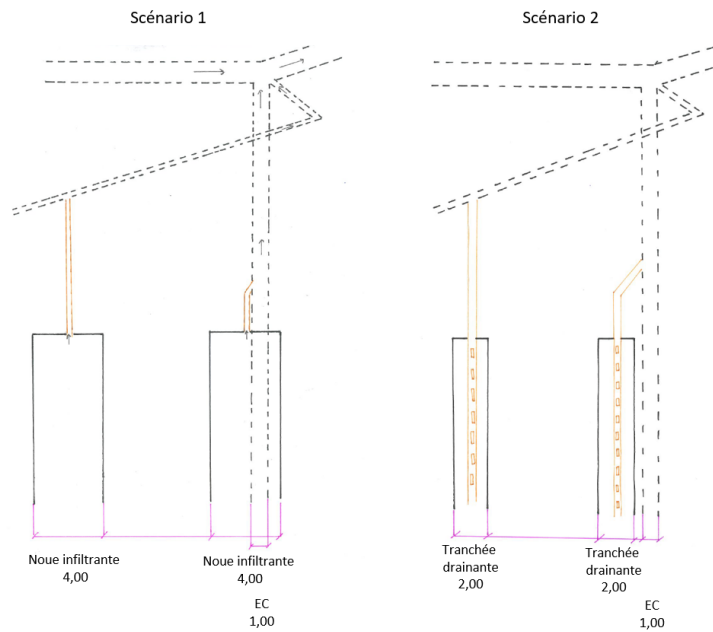


Figure 9.6: Schéma de principe du réseau de canalisations des eaux claires à la sortie des ouvrages de rétention.

9.11 Solutions zone NORD

Profil de la tranchée drainante
1:25

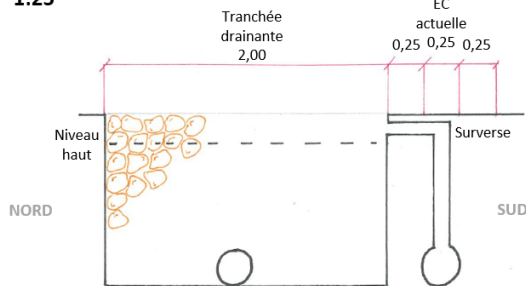


Figure 9.7: Profil de la tranchée drainante qui évacue les eaux du parking de la zone NORD.
©Loé Maire

Sortie de l'ouvrage de rétention
1:40

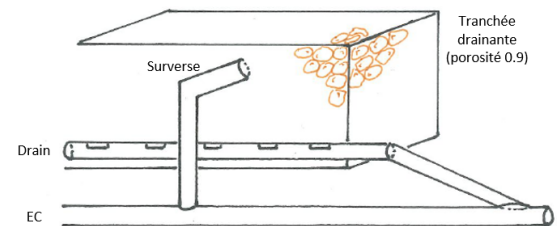


Figure 9.8: Détail de la sortie de la tranchée drainante.
©Loé Maire

Bibliographie

- [Agence de l'eau Rhin-Meuse , 2021] Agence de l'eau Rhin-Meuse (2021). La noue d'infiltration. *Gestion durable et intégrée des eaux pluviales - Foire aux questions*.
- [Al, 2019] Al, S. (2019). *Adapting Cities to Sea Level Rise : Green and Gray Strategies*. Island Press.
- [Allen et al., 1998] Allen, R. et al. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - Chapter 6*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [Andersen et al., 1999] Andersen, C. T. et al. (1999). The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation : development of a laboratory simulation experiment. *Hydrological processes*, 13 :597–609.
- [Ardizzone et al., 2019] Ardizzone, L. et al. (2019). Quantifying the socio-climatic impact of the integration of vegetation on the EPFL campus.
- [Berndtsson, 2010] Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality : A review. *Ecological Engineering*, 36 :351–360.
- [Bettina Schäfli, 2021] Bettina Schäfli (2021). "L'eau va localement et temporairement manquer en Suisse".
- [Binder et al., 2020] Binder, C. et al. (2020). *Sustainability assessment of urban systems*. Cambridge University Press.
- [Biogarten, 2021] Biogarten (2021). Biodiversité diversité des espèces – plantes et zones pour les papillons de jour et de nuit.
- [Björn Embren, 2017] Björn Embren (2017). Rendre l'eau au sol et à l'arbre de la cité.
- [Boesch, 2019] Boesch, F. (2019). Impact on thermal comfort and social acceptability of vegetation in an urban environment.
- [Brears, 2018] Brears, R. (2018). *Blue and green cities - The role of blue-green infrastructure in managing urban water resources*. palgrave macmillan.
- [Carpentier et al., 1999] Carpentier, P. et al. (1999). Robustesse de quelques indices de diversité à l'échantillonnage. *Océanis*, 25 :435–455.
- [Cerema, 2016] Cerema (2016). Une norme ISO internationale pour les villes durables.
- [Chan et al., 2018] Chan, F. K. S. et al. (2018). "Sponge City" in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy*, 76 :772–778.
- [Chocat et al., 2020] Chocat, B. et al. (2020). Quelle capacité d'infiltration retenir pour le dimensionnement des Techniques Alternatives ?
- [Chu et al., 2019] Chu, L. et al. (2019). Evaluation of surface infiltration performance of permeable pavements. *Journal of Environmental Management*, 238 :136–143.
- [Coccolo, 2017] Coccolo, S. (2017). Bioclimatic Design of Sustainable Campuses using Advanced Optimisation Methods.
- [Coccolo et al., 2018] Coccolo, S. et al. (2018). Cooling potential of greening in the urban environment, a step further towards practice. *Sustainable Cities and Society*, 38 :543–559.
- [Commune d'Ecublens, 2021] Commune d'Ecublens (2021). Géoportail d'Ecublens - Système d'information du Territoire.
- [Conseil Fédéral, 2019] Conseil Fédéral (2019). Le Conseil fédéral vise la neutralité climatique en Suisse d'ici à 2050.
- [Davies et al., 2015] Davies, C. et al. (2015). Green infrastructure planning guide.
- [Desrosières, 2003] Desrosières, A. (2003). Les qualités des quantités. *Courrier des statistiques*, 105-106 :51–63.
- [Deutsch et al., 2003] Deutsch, J.-C. et al. (2003). Review of the Use of stormwater BMPs in Europe.

- [Du et al., 2019] Du, X. et al. (2019). The performance of gravity-driven membrane (GDM) filtration for roofing rainwater reuse : Implications of roofing rainwater energy and rainwater purification. *Science of the Total Environment*, 697.
- [Dukes et al., 2009] Dukes, M. et al. (2009). Smart irrigation controllers : operation of evapotranspiration-base controllers. *EDIS*.
- [Durabilité EPFL, 2018] Durabilité EPFL (2018). Campus durable EPFL : faits marquants 2018.
- [Durabilité EPFL, 2021] Durabilité EPFL (2021). Notre stratégie.
- [Ecohabitation, 2013] Ecohabitation (2013). Le système de collecte de l’eau de pluie : le captage, le pré-lavage, les tuyaux.
- [Etat de Fribourg, 2019] Etat de Fribourg (2019). Pluies de projet et débits ruisselés - aide à l’exécution.
- [Etat de Fribourg, 2021] Etat de Fribourg (2021). Plan Climat cantonal. Stratégie et plan de mesures 2021-2026.
- [Etat de Vaud, 2020a] Etat de Vaud (2020a). Gestion intégrée des risques.
- [Etat de Vaud, 2020b] Etat de Vaud (2020b). Stratégie du Conseil d’État vaudois pour la protection du climat.
- [Ferland, 2015] Ferland, A. (2015). La conservation de la biodiversité en milieu urbain : comment aménager les villes du monde ?
- [Fu et al., 2010] Fu, W. et al. (2010). Characterizing the “fragmentation–barrier” effect of road networks on landscape connectivity : A case study in Xishuangbanna, Southwest China. *Landscape and Urban Planning*, 95 :122–129.
- [GIEC, 2021] GIEC (2021). *AR6 Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- [Gogate et al., 2016] Gogate, N. G. et al. (2016). Assessment of stormwater management options in urban contexts using Multiple Attribute Decision-Making. *Journal of Cleaner Production*, 142 :2046–2059.
- [Grilo et al., 2020] Grilo, F. et al. (2020). Using green to cool the grey : Modelling the cooling effect of green spaces with a high spatial resolution. *Science of the Total Environment*, 724 :49–55.
- [GuidEnR Haute Qualité Environnementale, 2020] GuidEnR Haute Qualité Environnementale (2020). Techniques alternatives de dépollution des eaux pluviales - Tranchées drainantes.
- [Herb et al., 2008] Herb, W. et al. (2008). Ground surface temperature simulation for different land covers. *Journal of Hydrology*, 356 :327–353.
- [ICARE et al., 2012] ICARE et al. (2012). Guide de recommandations pour lutter contre l’effet d’îlot de chaleur urbain à destination des collectivités territoriales.
- [Jacques Beauchamp, 2006] Jacques Beauchamp (2006). L’eau et le sol.
- [Jerome et al., 2019] Jerome, G. et al. (2019). A framework for assessing the quality of green infrastructure in the built environment in the UK. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40 :174–182.
- [Jia et al., 2015] Jia, H. et al. (2015). China’s ambitious sponge city initiative : a monumental effort for green/gray infrastructure integration. *EWRI Currents*, 17.
- [Keniger et al., 2013] Keniger, L. et al. (2013). What are the Benefits of Interacting with Nature ? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10 :113–935.
- [Kindlmann et al., 2008] Kindlmann, P. et al. (2008). Connectivity measures : a review. *Landscape Ecol*, 23 :879–890.
- [Laboratoire LESO-PB, 2021] Laboratoire LESO-PB (2021). Climate change mitigation and adaptation.
- [Lee et al., 2018] Lee, H. et al. (2018). Thermal comfort of pedestrians in an urban street canyon is affected by increasing albedo of building walls. *Journal of Biometeorology*, 62 :1199–1209.

- [Les Services de Bordeaux Métropole, 2017] Les Services de Bordeaux Métropole (2017). MATÉRIAUX - notions de base, matériaux modulaires, matériaux non modulaires matériaux d'interface.
- [Li et al., 2019] Li, Q. et al. (2019). Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction : A case study in Guangxi, China. *Journal of Environmental Management*, 231 :10–20.
- [Liang et al., 2020] Liang, C. et al. (2020). An integrated framework to select resilient and sustainable sponge city design schemes for robust decision making. *Ecological Indicators*, 119.
- [Louis Roussel, 1972] Louis Roussel (1972). *Photologie forestière*. Masson.
- [Ma et al., 2020] Ma, Y. et al. (2020). China's sponge city development for urban water resilience and sustainability : A policy discussion. *Science of the Total Environment*, 729.
- [Mauree et al., 2016] Mauree, D. et al. (2016). Multi-scale modelling to access human comfort in urban canyons. *Expanding Boundaries - Systems Thinking in the Built Environment*.
- [MétéoSuisse, 2013] MétéoSuisse (2013). Scénarios climatiques Suisse – un aperçu régional. *Rapport technique n° 243 MétéoSuisse*.
- [Nagendra, 2002] Nagendra, H. (2002). Opposite trends in response for the Shannon and Simpson indices of landscape diversity. *Applied Geography*, 22 :175–186.
- [National Centre for Climate Services (NCCS), 2018] National Centre for Climate Services (NCCS) (2018). CH2018 web atlas.
- [Nehls et al., 2020] Nehls, T. et al. (2020). Water dynamics at the urban soil-atmosphere interface - rainwater storage in paved surfaces and its dependence on rain event characteristics. *Journal of soils and sediments*, 21 :2025–2034.
- [Nezeys, 2013] Nezeys, A. (2013). Un zonage pluvial pour Paris : réintégrer les eaux pluviales dans le grand cycle de l'eau.
- [Nikolopoulou et al., 2003] Nikolopoulou, M. et al. (2003). Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 35 :95–101.
- [Nikolopoulou et al., 2006] Nikolopoulou, M. et al. (2006). Thermal comfort in outdoor urban spaces : Analysis across different European countries. *Energy and Buildings*, 41 :1455–1470.
- [OFEFP, 2000] OFEFP (2000). Où évacuer l'eau de pluie.
- [OFEV, 2013] OFEV (2013). Plans d'action pour les espèces prioritaires au niveau national.
- [OFEV, 2020] OFEV (2020). Changements climatiques en Suisse : rapport sur les causes, conséquences et mesures.
- [Office Fédérale de la Protection de la Population, 2013] Office Fédérale de la Protection de la Population (2013). Glossaire des risques.
- [Organe consultatif sur les changements climatiques, 2007] Organe consultatif sur les changements climatiques (2007). Les changements climatiques et la Suisse en 2050.
- [Organisation des Nations Unies, 2021] Organisation des Nations Unies (2021). Climat : le nouveau rapport du GIEC est une « alerte rouge pour l'humanité » (Guterres).
- [Organisation internationale de normalisation, 206] Organisation internationale de normalisation (206). ISO 37101 - Développement durable des communautés.
- [Papet et al., 2020] Papet, G. et al. (2020). Comment intégrer les continuités écologiques à la séquence ERC avec les outils de graphes paysagers ?
- [Petty Son & Prestwich, 2021] Petty Son & Prestwich (2021). Why finding the best driveway surface matters.
- [praja, 2019] praja (2019). Fear and Tender S.U.R.E.
- [Rhiannon Crain, 2015] Rhiannon Crain (2015). An Introduction to Habitat Connectivity.

- [Rochat, 2014] Rochat, E. (2014). Impact du processus d’urbanisation sur la connectivité fonctionnelle et la diversité génétique dans les agglomérations Genevoise et Marseillaise. *Projet de master*.
- [Rochat, 2020] Rochat, E. (2020). Species conservation in the face of global environmental changes : surface-based modelling of geo-environmental data to identify vulnerable populations. *Thèse de doctorat*.
- [Sandström, 2002] Sandström, U. (2002). Green Infrastructure Planning in Urban Sweden. *Planning Practice Research*, 17 :373–385.
- [SARP, 2019] SARP (2019). L’histoire de l’assainissement.
- [Saura et al., 2007] Saura, S. et al. (2007). A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning : Comparison with existing indices and application to a case study. *Landscape and Urban Planning*, 83 :91–103.
- [Savva et al., 2002] Savva, A. et al. (2002). Crop Water Requirements and Irrigation Scheduling - Irrigation Manual. Module 4.
- [Seidl et al., 2013] Seidl, M. et al. (2013). Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs. *Environmental Pollution*, 183 :195–203.
- [SEPA, 2021] SEPA (2021). Pavés drainants à joints larges.
- [Service public, 2020] Service public (2020). Récupération de l’eau de pluie.
- [She et al., 2021] She, L. et al. (2021). Multi-objective layout optimization for sponge city by annealing algorithm and its environmental benefits analysis. *Sustainable Cities and Society*, 66.
- [Starke et al., 2011] Starke, P. et al. (2011). Effects of different water-permeable pavement designs on evaporation rates. *Water Science Technology*, 63.
- [Steine von Steinbach, 2018] Steine von Steinbach (2018). Texturen.
- [SYMASOL, 2016] SYMASOL (2016). Gestion des eaux pluviales : guide pour la mise en oeuvre de techniques alternatives.
- [Séchaud et al., 2021] Séchaud, R. et al. (2021). Biodiversité du campus de l’Université de Lausanne : inventaires floristiques et faunistiques. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 100 :231–255.
- [Taguchi et al., 2020] Taguchi, V. et al. (2020). It Is Not Easy Being Green : Recognizing Unintended Consequences of Green Stormwater Infrastructure. *Water*, 12 :522.
- [UNIL-EPFL, 2021] UNIL-EPFL (2021). Campus de Dorigny - Schéma directeur des Hautes Ecoles (SDHE).
- [Vallee, 2017] Vallee, A. (2017). Prise en compte de la biodiversité dans les plans directeurs communaux du Canton de Genève : Développement d’un indice d’écopotentialité urbaine. *Mémoire de certificat complémentaire en géomatique*.
- [Ville de Lausanne, 2016a] Ville de Lausanne (2016a). Directive municipale relative aux mesures de gestion des eaux claires.
- [Ville de Lausanne, 2016b] Ville de Lausanne (2016b). Les arbres à Lausanne.
- [Ville de Lausanne, 2019] Ville de Lausanne (2019). Toitures végétalisées - Pourquoi et comment accueillir la nature sur son toit ?
- [Ville de Lille, 2021] Ville de Lille (2021). Choisir les matériaux et coloris des espaces extérieurs, toitures et façades en tenant compte de leur albédo et de leur émissivité. *Pacte Lille Bas Carbone*.
- [Ville de Morges, 2020] Ville de Morges (2020). Calcul du débit de restitution et du volume du bassin de rétention.
- [Ville de Neuchâtel, 2004] Ville de Neuchâtel (2004). Les revêtements perméables. Conseils pour la réalisation et l’entretien.
- [Ville de Sion, 2017] Ville de Sion (2017). Guide des aménagements extérieurs.

- [Voogt et al., 2002] Voogt, J. et al. (2002). Urban Heat Island. *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 3 :660–666.
- [VSA, 2019a] VSA (2019a). Gestion des eaux urbaines par temps de pluie - Module de base.
- [VSA, 2019b] VSA (2019b). Infiltration et rétention des eaux pluviales en milieu bâti.
- [Vu, 2011] Vu, B. (2011). Le guide de l'eau domestique.
- [Wang et al., 2018] Wang, H. et al. (2018). A new strategy for integrated urban water management in China :Sponge city. *Science China - Technological Sciences*, 61 :317–329.
- [Wang et al., 2021] Wang, S. et al. (2021). Sponge City and social equity : Impact assessment of urban stormwater management in Baicheng City, China. *Urban Climate*, 37.
- [Wermeille, 2014] Wermeille, E. (2014). Liste rouge Papillons diurnes et Zygène. *OFEV*.
- [Wouters et al., 2016] Wouters, P. et al. (2016). Blue-Green Infrastructures as tools for the management of urban development and the effect of climate change.
- [Wu et al., 2013] Wu, G. et al. (2013). Understanding resilience. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 7 :10.
- [Xia et al., 2017] Xia, J. et al. (2017). Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China. *Science China Earth Sciences*, 60 :652–658.
- [Xiu et al., 2015] Xiu, N. et al. (2015). The challenges of planning and designing urban green networks in Scandinavian and Chinese cities. *Journal of Architecture and Urbanism*, 40 :163–176.
- [Xiu et al., 2020] Xiu, N. et al. (2020). Applying a socio-ecological green network framework to Xi'an City, China. *Landscape and Ecological Engineering*.
- [Yang et al., 2021] Yang, Y. et al. (2021). Performance assessment of sponge city infrastructure on stormwater outflows using isochrone and SWMM models. *Journal of Hydrology*, 597.
- [Zeller et al., 1979] Zeller, J. et al. (1979). *Précipitations extrêmes dans les Alpes suisses et leurs régions limitrophes*. Vol. 4. Institut fédéral de recherches forestières, Birmensdorf.
- [zo2, 2021] zo2 (2021). L'essentiel sur la récupération de l'eau de pluie.

Glossaire

adaptation Capacité d'ajustement des systèmes face au changement climatique. 4

atténuation Réduction des gaz à effet de serre visant à atténuer les impacts du réchauffement climatique. 4

bleu Les infrastructures bleues se réfèrent aux infrastructures en lien avec les fonctions hydrologiques telles que les systèmes de gestion des eaux de pluies et de ruissellement ou les systèmes de réutilisation de l'eau. En termes de résilience, les infrastructures bleues doivent assurer l'alimentation constante en eau potable et la sécurité face aux inondations. Elles représentent donc les aspects de contrôle de la quantité et qualité de l'eau. [Wouters et al., 2016]. 5

résilience Capacité d'un système à s'adapter positivement après un événement extrême [Wu et al., 2013]. 4

rétenion artificielle Ouvrages de rétention en matériaux non naturels et où aucune infiltration dans le sol n'est possible de part la structure de l'ouvrage. Par exemple les bassins de rétention enterrés, les bassin de rétention à ciel ouvert en béton, acier, etc. 7

rétenion environnementale Ouvrages de rétention composés de végétation ou de matériaux naturels et où la structure des ouvrages permettent une infiltration directement dans le sol. Par exemple les noues, jardins pluviaux, des tranchées semi infiltrantes et drainantes, etc. 7

vert Les infrastructures urbaines vertes représentent toutes les ressources environnementales des espaces urbains. Ce sont les espaces de végétation tels que les parcs, jardins, allées d'arbres, toitures végétalisées, etc. créant un réseau d'espaces ouverts. Lorsque ces espaces sont interconnectés, ils forment le corridor écologique. Les infrastructures vertes permettent donc de conserver les valeurs et fonctions des écosystèmes naturels et apportent des bénéfices à la population humaine [Davies et al., 2015]. 5